



中国电力百科全书

（第三版）



·电工技术基础卷·

《中国电力百科全书》编辑委员会
《中国电力百科全书》编　辑　部　编

中国电力出版社



中国电力百科全书

（第三版）

电工技术基础卷

《中国电力百科全书》编辑委员会 编
《中国电力百科全书》编 辑 部

CHINA ELECTRIC POWER ENCYCLOPEDIA

中国电力出版社



图书在版编目（CIP）数据

中国电力百科全书. 电工技术基础卷 /《中国电力百科全书》编辑委员会,《中国电力百科全书》编辑部编. —3 版. —北京：中国电力出版社，2014. 6
ISBN 978 - 7 - 5123 - 5555 - 2

Ⅰ. ①中…　Ⅱ. ①中…　②中…　Ⅲ. ①电力工业-中国-百科全书②电工技术-概况-中国　Ⅳ. ①TM - 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 032122 号

中国电力出版社出版、发行（北京市东城区北京站西街 19 号　100005　http：//www.cepp.sgcc.com.cn）
北京盛通印刷股份有限公司印刷　各地新华书店经售
1995 年 10 月第一版　2014 年 6 月第三版　2014 年 6 月北京第五次印刷
889 毫米×1194 毫米　16 开本　31.75 印张　1382 千字
印数 16041—21040 册　定价 **278.00** 元



编辑委员会

编辑委员会顾问委员会

编辑委员会办公室

编　辑　部



编辑委员会



编辑委员会

电工技术基础卷

（第三版）

编审委员会

各分支主编、副主编

电工技术基础卷

（第一版）

编审委员会

主　　编　肖达川

副 主 编　刘子玉　于　渤　陈允康

编审领导小组　肖达川　刘子玉　于　渤　陈允康　张玉诸

编　　委　（按姓氏笔画排列）

于　渤　叶德璇　朱德恒　刘子玉　肖达川

吴南屏　陈允康　陈昌渔　陈增武　何金茂

张玉诸　张德馨　唐统一　谈克雄　蒋静坪

特约编委　王明俊　李启盛　袁季修　姜咸宁

各分支主编、副主编、编审组成员

电工基础分支

主　　编　陈允康（兼）

编审组成员　肖达川（兼）

李瀚荪　马信山

电子技术基础分支

主　　编　何金茂

副 主 编　叶德璇

编审组成员　林雪亮　张志清

电磁测量分支

主　　编　唐统一

副 主 编　谈克雄

电工材料分支

主　　编　刘子玉（兼）

吴南屏

编审组成员　刘耀南　赵富鑫

吴百诗

高电压技术基础分支

主　　编　朱德恒

副 主 编　陈昌渔

编审组成员　张仁豫　谈克雄

自动控制理论分支

主　　编　于　渤（兼）

副 主 编　蒋静坪

编审组成员　顾锦汶

电子计算机分支

主　　编　张德馨

副 主 编　陈增武

编审组成员　汤子瀛

电工技术基础卷

（第二版）

编审委员会

主　　编　陈昌渔

副 主 编　于　渤　谈克雄

编审领导小组　陈昌渔　于　渤　谈克雄　肖达川　姜丽敏

编　　委　（按姓氏笔画排列）

于　渤　叶德璇　朱德恒　江缉光　肖达川

吴百诗　吴南屏　赵　伟　陈昌渔　陈基禄

陈骏林　谈克雄　姜丽敏　蒋静坪

各分支主编、副主编

电工基础分支

主　　编　江缉光

电子技术基础分支

主　　编　叶德璇

电磁测量分支

主　　编　谈克雄（兼）

副 主 编　赵　伟

电工材料分支

主　　编　吴南屏

副 主 编　吴百诗

高电压技术基础分支

主　　编　朱德恒

副 主 编　陈昌渔（兼）

自动控制理论分支

主　　编　于　渤（兼）

副 主 编　蒋静坪

计算机分支

主　　编　陈骏林

副 主 编　陈基禄

第三版前言

《中国电力百科全书》（简称《电百》）第三版在中国电机工程学会成立80周年之际与广大读者见面了。《电百》是全面介绍电力科学技术和管理知识的大型专业性百科全书。《电百》的首次编纂始于1986年，先后于1994年和2001年出版发行了第一版和第二版。《电百》问世以来，受到了广大电力工作者和电机工程界人士的欢迎并得到认可，成为查阅电力基本知识的权威工具书。

《电百》第一版是由原水利电力部、中国电机工程学会、中国水力发电工程学会等共同倡议，从1986年开始，历时8年编纂完成的。全书分为《综合卷》《电工技术基础卷》《电力系统卷》《火力发电卷》《水力发电卷》《核能及新能源发电卷》《输电与配电卷》《用电卷》共8卷，5000多个条目、1000余万字。全书总结了当时电力工业科学技术成就以及生产和建设的经验，适应了电力科技人员和职工学习新技术、新知识的迫切需要。《电百》第二版的修编工作是在原国家电力公司组织下，从1998年开始到2000年完成。全书仍为8卷，共5400余条目，约1000万字，反映了20世纪最后十多年电力工业的快速发展和电力科技的进步，适应了中国电力工业发展的需要。《电百》第二版于2002年荣获第十三届中国图书奖。

《电百》第二版发行至今的十多年间，中国电力工业持续快速发展，电力科技水平不断提高。中国电力装机容量和发电量分别从2000年的3.19亿kW、1.37万亿kW·h提高到2013年的12.47亿kW和5.3万亿kW·h，均居世界第一位。电网发展也实现了历史性跨越，规模居世界第一，已经形成以区域同步电网为基础的全国互联电网（未计台湾省）。这十多年，电力系统结构逐步优化，技术装备水平快速提升，节能减排成效显著。电力系统的安全性、可靠性、经济性取得全面提高，适应了经济和社会发展对用电量增长和安全可靠供电的需要，有力支撑了国民经济的持续快速发展。

进入21世纪，中国经济社会发展的重要特征是工业化、信息化、城镇化、市场化、国际化，能源结构清洁低碳化趋势显著。这些重大社会需求决定电能高效清洁的生产、输送、分配和使用技术，已成为电力技术发展的主导方向，并且日益显现出新技术与传统技术交叉与融合的趋势。因此，有必要对《电百》第二版进行修编，更新和充实《电百》的内容，以充分反映21世纪头十年电力工业发展的新成就和电力科技发展的新特征。

2009年5月，在中国电机工程学会第九届会员代表大会上提出了《电百》第三版修编工作建议，得到会员单位广泛支持。2011年1月25日，《电百》第三版编辑委员会第一次会议在北京召开，修编工作正式启动，确定修编原则是“增补为主，简当为要”。

增补为主，就是要增补体现电力工业和电力科技发展的新内容。如全球气候变化、全寿命周期管理、信息安全等问题；在水力发电技术方面，包括高坝筑坝新技术、大型水轮机组集成技术、梯级水库群优化调度技术等；在火力发电技术方面，包括超超临界燃煤发电、大型火电机组直接空冷、整体煤气化联合循环发电（IGCC）及多联产、污染物控制和减排等技术；在现代核电技术方面，包括对投运核电机组通用技术的系统性介

绍，第三代先进压水堆技术AP1000、EPR，以及模块式高温气冷堆技术和第四代核能系统概况等；在可再生能源发电技术方面，包括风能资源评估、新型风电机组总体设计和关键部件制造、风电并网等技术，太阳能热发电及分布式光伏发电技术，以及深层地热和海洋能、潮汐能发电等新技术；在电网技术方面，包括特高压交直流输电技术、750kV超高压输电技术、智能电网技术、大型互联电网的分析和控制技术、电压源型直流输电技术等；还有现代信息通信技术、电力电子技术的新发展和新材料在电力系统中的应用等等。

根据电力科技发展的新趋势，《电百》第三版共设9卷，在第二版8卷的基础上，将《输电与配电卷》更名为《输电与变电卷》、《用电卷》更名为《配电与用电卷》，将《核能及新能源发电卷》拆分为《核能发电卷》和《新能源发电卷》。第三版的条目总数约为6300条，字数约1300万字。条目释文中，中国电力工业的数据一般截至2012年12月，国外电力工业的数据一般截至2011年12月，能源资源等数据以最新公布的为准。

简当为要，是百科全书的特征之一。百科全书是概要记述人类知识的大型工具书。《电百》第三版的释文编纂按照百科体例的编纂要求和“全、精、新、信、达、雅”的撰写质量要求，依据科学性、客观性、概述性、整体性、稳定性、可读性、规范性的百科特点进行修编。全书统一编纂指导思想、框架设计和体例要求，解决内容重复、交叉、矛盾和遗漏等问题。对修编条题，注重其概要性、知识性和逻辑性；对新增条题，博览精收、慎重选材，做到既简且当。同时，各卷都编写了概述性文章（专文）和大事年表。概述性文章是对本卷内容概括性介绍，体现本专业的特点、发展、现状和水平；大事年表是以编年体形式记录具有全局性、标志性、方向性的事情。读者通过概述性文章和大事年表可以对电力技术的发展有全面系统的了解，更加体现了简当为要的要求。

《电百》第三版修编实行主编责任制，编辑委员会组织了既有理论底蕴又有实践经验的1500多位专家、学者参与条目的撰写和审稿，其中卷正副主编和分支正副主编220余位。

《电百》第三版贯彻以科学发展观为指导，谋篇、谋卷、谋书，努力用全面协调可持续发展的观点，分析判断近十年来电力科技领域出现的新事物和新观点，集中反映21世纪初中国电力科技事业蓬勃发展的概貌，展示出其对中国乃至世界电力工业技术发展基本走向的影响。

在《电百》第三版即将付印的时候，我们十分感念那些为“电力百科”开启山林的拓荒者，他们为我们做出了榜样。《电百》第三版继承了第一、二版在知识分类、编辑体例、图表配置、全书条题检索等方面的工作经验和成果，并将前一、二版的双色印刷调整为全彩印刷，将原正16开本调整为大16开本，从而使第三版从内容到版式都有了更大的改进。令我们感到鼓舞的是，《电百》第三版获得了2014年度国家出版基金的资助，入选《2013—2025年国家辞书编纂出版规划》。

我们还要再一次向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！1500多位专家、学者的志愿工作、三年多的智慧和心血，凝结成为今天的鸿篇巨制。电力科学技术在飞速发展，希望《电百》第三版对电力科技工作者和管理人员能够有所裨益，更好地发挥其“没有围墙的大学”的功能。

《中国电力百科全书》编辑委员会

《中国电力百科全书》编　辑　部

2014年5月

第一版前言

经过8年的反复锤炼，《中国电力百科全书》终于脱稿付印，陆续出版了！这是1700多位专家，以高度的政治责任感和历史责任感辛勤耕耘、反复切磋的成果。参加这部百科全书编纂工作的同志大部分是电业部门的专家和著名大学的教授，也有很多电机制造部门的专家，用电电器研究方面的专家，核工业专家，能源专家，环境保护专家等等；他们是各个专业方面的权威人士，大都年事已高，仍不遗余力地以自己毕生的经验，参照大量的国际资料，字斟句酌地推敲每一个条目的释文；他们以满腔热情，努力争取时间，完成了5000多个条目、1000多万字的撰写、审阅、修改工作；在编写过程中有的老专家废寝忘食、带病工作，有的已经谢世。我们以十分崇敬和感激的心情向为本书工作过的专家们致以崇高的敬礼！

《中国电力百科全书》是于1986年8月由原水利电力部科技司、中国电机工程学会、中国水力发电工程学会、原水利电力出版社共同倡议，经原水利电力部部长批准，着手组织编纂的。1987年8月，在北京召开了编辑委员会成立大会，初步确定了分卷方案和条题框架，聘请各卷主编和各分支主编。之后，几经修改，拟定了各卷的条题总表，聘请了撰写和审阅的专家，于1989年着手撰写，先后经过分支的一审、修改，分卷的二审、修改，编委会常务领导小组组织的终审，再由分卷修改正式定稿。

编纂《中国电力百科全书》的目的，在倡议报告中已经指明，是“为了总结我国电力工业生产、建设的经验，介绍当代电力工业最新科学技术成就，迎接电力工业更大规模的发展，满足电力系统广大职工的需要。”当前，我们正在建设规模宏伟的现代化的电力工业，我们正在深入改革开放，经历从高度集中的计划经济到社会主义市场经济的变革，成百万的电业职工迫切需要学习新的技术和新的管理知识。同时，随着我国工农业现代化程度的提高，人民生活电气化程度的普及和提高，社会上对电力知识的需要也日益广泛。为此，本书的编纂，从格式到内容，均以满足电力科学技术人员、各级领导和管理人员、广大电业职工和大专院校电力类专业师生的需要为主，同时照顾到社会上广大读者的需要，力求深入浅出，使具有高中以上文化程度的人均可阅读。

《中国电力百科全书》是中国第一部全面介绍电力科学技术和管理知识的大型专业性百科全书。在编纂过程中，我们学习和借鉴了《中国大百科全书》的编纂经验，同时，也汲取了此前编纂的《中国水利百科全书》的经验。百科全书要求表达人类成熟的知识，要求所表达的知识具有科学性、客观性和稳定性，亦即具有一定的权威性。为此，本书在条题名称的选定和条目释文的概念叙述方面，均力求符合当代国际电业界一般共有的认识，对于某些国内惯用的概念与国外流行的概念不一致的，均分别加以说明。考虑到篇幅浩大，读者所需要的专业内容不一，特将全书按专业分为既有联系又相对独立的8卷，即：综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能及新能源发电、输电与配电、用电。读者可购置全套8卷，也可购置其中任何一卷。每卷条目排印均按

条目首字的汉语拼音顺序排列。为了便于读者按专业查找相关条目，在书首设有按专业知识分类的条目分类目录，在书尾设有3种检索系统，即条目汉字笔画索引、条目外文索引、内容索引。综合卷后还附有外国（国际）电力（能源）组织机构和学术团体译名对照表，以及中国电力工业大事年表。

为了记录近百年来，特别是中华人民共和国成立以来，为中国电业发展做出过重要贡献的人物，为中国电业发展培养了大量科技人才的优秀教师和学者，以及为中国电业的发展提供电力设备的电机、电器、动力设备制造部门的著名专家，共收录了3000多位人物的业绩，编纂了《中国电力人物志》，作为《中国电力百科全书》的附卷单独出版。

以上8卷和附卷中，条目释文中所载的史实和数据大都截止到1990年12月；对1990年12月之后国际时局的变化所引起国家的改变，均未作相应的修改。

本书的编纂和出版，是广大专家集体智慧的结晶和集体工作的成果，一个条目的释文往往经过多位专家多次修改才得以定稿，前后变动很大，甚至重新改写。但是，应该说明，没有第一稿的写出，也改不出最后一稿。所以，一个条目的写定，既是最后执笔者的成果，也是第一稿执笔者的成果。在反复修改过程中，专家们都不固执己见地热烈参与磋商讨论，务求循名责实，考虑全面，得出一个正确的概念，在这方面充分体现了他们对事业的政治责任感和对后代的历史责任感。电力方面的百科全书，在中国这是第一部，在国外，我们也未见先例。因此，尽管我们尽其可能地作了努力，但疏漏与错误之处还不可避免，我们诚恳地希望广大读者和专家给予批评和指正，以期本书再版时订正提高。

再一次向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！

《中国电力百科全书》编辑委员会

《中国电力百科全书》编　辑　部

1994年6月

第二版前言

《中国电力百科全书》（简称《电百》）的编纂工作始于 1986 年，在国家电力领导部门的重视和社会各界的关注下，全国 1700 多位专家、学者历时 8 年终成腋裘，付梓刊行。

《电百》（第一版）条目释文引用的数据和资料基本上截至 1990 年底。十年来，世界电力工业的状况发生了重大变化。作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，电力在推动社会经济进步、提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。十年来，电力工业围绕进一步提高能源利用效率和供电可靠性，加强对生态环境的保护从而实现可持续发展，在许多技术领域取得了重大进步。例如，在洁净煤发电技术研究开发与应用方面，已相继建成示范电厂并开始商业运营；大容量、超临界和超超临界压力机组迅速发展，正在成为发达国家火力发电厂的主力机组；广泛采用新技术加强对有害排放物、电磁波、放射性污染的治理；高电压、大容量、远距离交直流输电技术和电力系统理论与技术的继续进展与提高；高效率燃气轮机技术的发展与应用；分散型电、热、冷三联供装置和大幅度提高电力用户终端效率的各种新技术、新装置的相继出现，以及计算机技术和信息网络技术在电力工业中的应用等等，正在明显地改变电力工业的技术状况。与此同时，世界范围内经济的市场化、信息化、全球化正在给电力行业传统的垄断地位和经营方式带来巨大的冲击。随着竞争机制的引入，许多国家的电力管理体制已经或正在经历空前的变革，向着放松管制的商业化、民营化方向发展。

在世界各国电力科学技术发展和管理体制变革的同时，中国电力工业在 90 年代取得了突飞猛进的发展。从 1996 年下半年起，全国电力供需基本平衡，结束了持续 20 多年全国性缺电的局面，基本上适应了国民经济发展和人民生活水平提高对电力的需求。1995 年全国电力装机总容量达到 2 亿 kW，年发电量超过 10 000 亿 kW·h；1999 年全国电力装机总容量达到 2.98 亿 kW，年发电量达到 12331 亿 kW·h；2000 年 4 月，我国的装机容量超过了 3 亿 kW。无论在电力装机容量上还是在发电量上，中国电力都已居世界第二位。到 1999 年底，已建成和正在建设的 100 万 kW 及以上的火电厂、核电厂和水电站已超过 100 座，其中邹县发电厂 240 万 kW，二滩水电站 330 万 kW。世界最大的水电站、装机容量达 1820 万 kW 的三峡水电站已于 1994 年 12 月开工建设、1997 年 11 月实现了大江的截流，即将于 2003 年开始并网发电。继秦山核电厂和广东大亚湾核电厂投产后，广东岭澳核电厂（180 万 kW）和秦山第二核电厂（120 万 kW）、秦山第三核电厂（140 万 kW）及田湾核电厂（200 万 kW）均已开工建设。风力、地热、太阳能、潮汐等可再生能源发电也得到进一步的发展。全国风力发电装机总容量已达 26.7 万 kW，在中国的西部地区建成了一批小容量试验性的太阳能光伏电站。到 90 年代末，中国已建成的 500kV 输电线路约 2.29 万 km，变电容量 8012 万 kV·A；330kV 输电线路 7949km，变电容量 1248 万 kV·A；220kV 输电线路 12.18 万 km，变电容量 2.80 亿 kV·A；同时还进行了大规模的城乡电网建设与改造。目前在全国已形成了 7 个跨省的大型区域电网和 5 个独立省网，其中最大的区域电网

华东电网装机容量已达5198.64万kW，最大的省网广东电网装机容量也达到3033.37万kW，全国电网的覆盖率已达到96.4%。中国的电网已进入了跨大区、跨独立省（区）电网互联的阶段，并正在走向全国联网的超高压、高度自动化的现代化电力系统的新阶段。

在过去的10多年里，中国电力工业的管理体制经历了巨大的变化。1988年4月撤销了水利电力部，成立了能源部；1993年3月又撤销能源部，组建电力工业部；1997年成立国家电力公司，1998年电力工业部撤销。按照国务院的改革方案，国家电力公司经营管理授权范围内的国有电力企业，国家经贸委行使管理中国电力工业的政府职能，中国电力企业联合会行使电力行业管理与服务职能。这是中国电力管理体制的重大改革，是中国电力工业由计划经济向市场经济转变的重要标志。

根据电力科学技术在90年代所取得的重大进展、管理体制的变革情况，以及中国国民经济在2000～2010年期间再翻一番和2010年中国电力装机总容量将发展到5亿kW的总目标，为了使《电百》的内容能够反映当前国际和国内电力工业的最新技术和管理水平，适应21世纪前十年我国电力工业发展的需要，进一步满足各级领导干部、电力系统内外的科学技术和管理人员以及广大读者查询、浏览、了解现代电力科学技术和管理知识的需求，中国国家电力公司决定，对《电百》（第一版）进行修订，并于2000年9月起陆续出版《电百》（第二版）。

编纂出版《电百》（第二版）的总原则是：在第一版的基础上对各卷内容删繁就简，增补更新，力求达到精益求精；努力增加最新电力科学技术成就和管理经验的内容，注意解决第一版中存在的问题和不足；使《电百》（第二版）具有时代特征，符合规范要求，开卷有益，查阅方便。

《电百》（第二版）的编纂工作于1998年8月起动。为了使《电百》能以条目的形式汇集和总结电力科学技术和管理知识，真正发挥大型专业性百科全书的作用，我们组织了电力工业各门类的约1100位专家、学者参加了修订、编纂和审稿工作。这些专家怀着满腔热忱、高度责任感和使命感，废寝忘食、夜以继日地工作，以广博的知识和丰富的经验，使《电百》条目的释文尽可能完美地体现其思想和智慧。

《电百》（第二版）仍沿袭第一版的做法，采用按专业分类分卷、各卷条目按汉语拼音字顺编排的出书方式。全书仍分为综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能及新能源发电、输电与配电、用电等8卷，释文共有5400余条目，总字数约1000万字，其中新增条目和经过修改的条目约占全书的70%以上。

尽管我们期待《电百》不仅具有电力科学技术知识的魅力，同时具有文字的魅力和鲜明的时代色彩，尽管我们希望广大读者在阅读与浏览，查询与解惑中能达到充实自己的目的，但书中难免有疏漏和错误之处，恳请读者批评指正，以期再版时订正。

谨向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢，是他们卓有成效的努力使本书为广大读者营造了一个开卷有益的氛围，使本书以气势恢宏的构架、翔实丰富的内容、精辟练达的文字、生动具体的彩色插图导引读者漫游电力科技知识的海洋。

《中国电力百科全书》编辑委员会
《中国电力百科全书》编 辑 部
2000年9月

凡　　例

一、编　　排

1. 全书按专业知识领域分为综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能发电、新能源发电、输电与变电、配电与用电等9卷出版。

2. 各卷按前言（包括全书第三版前言、第一版前言、第二版前言），凡例，概述性文章，本卷第一、二版前言，条目分类目录、正文、大事年表、条目标题汉字笔画索引、条目标题外文索引、内容索引、插图索引、附录等编排。

3. 全书的主体是条目。条目既是基本知识单元，也是基本寻检单元。条目由条目标题（条题）、释文和相应的图片、表格、参考书目等组成。

4. 全书条目按条目标题的汉语拼音字母顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括㇆乚く等）的顺序排列。第一字相同时，按第二字，余类推。条目标题以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的，按习惯发音依次排在汉语拼音相应字母部的前部。

5. 各卷在条目分类目录之前均有一篇介绍本卷内容的概述性文章。概述性文章从宏观上展现本卷的形象，且把本卷组成一个有机的整体，对本卷的条目起到统领作用，成为本卷的纲要。概述性文章介绍了本卷的专业特点、内容范围、历史发展和现状等内容，以帮助读者对本卷有概略而全面的了解。

6. 各卷均列条目分类目录，供读者按学科知识体系查检所需要的条目。为了保证各分支体系的完整性，有少数条目在不同分支目录里重复出现。条目分类目录还反映出条目间的系统性、层次性，例如：

电磁场
　静电场
　　电场强度
　　电荷
　磁场
　　磁通密度
　　磁场强度

7. 为保持知识体系的完整性和便于读者查阅，内容完全相同的条目，可以重复出现在不同卷。对卷间交叉的知识主题，条目列在以学科知识内容为主的卷中，在其他卷中则通过条目标题加以区别。

二、条　目　标　题

8. 条目标题由词或词组组成，例如“电路”“电压互感器”“永磁材料”；“动态系统辨识”“直流高电压测量”。

9. 条目标题一般由汉语标题和与汉语标题相对应的汉语拼音、外文三部分组成。例如：

dianliu

电流　(electric current)

个别无通用译名的纯属中国内容的条目标题则不附外文。条目标题有多个对应外文的，中间用分号（;）隔开。

三、释　　文

10. 条目释文使用规范化的现代汉语书面语言。条目释文开始一般不重复条目标题。

11. 条目释文较长时，设置层次标题。

12. 条目内容涉及其他条目并需由其他条目的释文补充的，采用“参见”的方式。所参见的条目标题在释文中出现的，用楷体字排印，例如“指示各连续等时限内平均功率最大值的电能表”。所参见的条目标题未在释文中出现的，则另用括号加“见”标出，例如“三相电源的电压是对称或接近对称的（见对称三相电路）”。全条与其他条目密切相关时，参见放在释文末尾，另行起写“见×××。”，不加括号。

13. 条目释文中出现的外国人名，第一次出现时在姓（汉译）前均加有外文名的缩写（即名的第一个字母），并在括号内附对应外文，例如I. 牛顿（Isaac Newton或I. Newton）。外国地名一般不附原文，个别生僻无标准译名的则在第一次出现时用括号附原文。

四、插　　图

14. 条目释文中配有必要插图，均随文编排。

15. 插图一般与释文相呼应。只有一个插图时，不编号。

16. 插图附有图题、图注等说明性文字。

五、参　考　书　目

17. 部分条目释文后附有参考书目，供读者选读。

六、索　　引

18. 各卷正文后均附有全部条目标题的汉字笔画索引、条目标题的外文索引，以及按音序编排的内容索引和插图索引。

七、其　　他

19. 全书所用科技名词术语以全国科学技术名词审定委员会审定的为准，未经审定和尚未统一的，从习惯。地名以中国地名委员会审定的为准。

20. 全书所用汉字除必须用繁体字的以外，一律使用国务院2013年6月公布的由教育部、国家语言文字工作委员会制定的《通用规范汉字表》所列的汉字。

21. 全书数字的使用，均执行GB/T 15835—2011《出版物上数字用法》。

22. 全书所用计量单位，除引用经验公式或涉及实验数据的精度难以改变，以及历史上所用的某些单位外，一律采用中华人民共和国法定计量单位。在表达量值时采用单位的国际符号。

23. 全书所列中国统计数据，一般未包含台湾省和香港、澳门特别行政区数据。

电工技术基础——电力工业发展的基石

王赞基　等

人类从自然界的雷电（见图 1）和天然磁石上开始注意到电磁现象。约公元前 16 世纪至公元前 11 世纪，中国殷商时代的甲骨文中已出现了“雷”字。约公元前 11 世纪至公元前 771 年，西周时代青铜器的铭文中出现了“電”字（见图 2）。古代的人类无法解释雷电产生的原因，只能将之归因于神，中国《山海经·海内东经》《云仙杂记·天鼓》和《楚辞·离骚》中都提到了雷神，中国神话中塑造了雷祖、电母（见图 3）的形象。在希腊神话中，主神宙斯掌管雷电云雨，被认为是人类的主宰。



图 1　闪电（Richard T. Cole　摄）

约公元前 585 年，古希腊自然哲学家泰勒斯（Thales of Miletus）发现摩擦起电现象，将琥珀与毛皮摩擦后，琥珀会吸引羽毛类轻微物体。公元前 239 年，中国战国时代吕不韦著《吕氏春秋》中最早出现磁石引铁的记载“慈石召鐵，或引之也”。公元 1 世纪初，中国东汉王充著《论衡》中记载“顿牟掇芥，礠石引针”，最早把静电现象和静磁现象并列。人类在日常活动中初步接触到了电现象和磁现象。在其后漫长的岁月中，人类对电现象和磁现象不断探索，认识逐步深入。17 世纪初，英国 W. 吉尔伯特（W. Gilbert）将静电现象称为 electricus（后演变为 electric—电），是源自“琥珀”一词的希腊文“ήλεκτρον”和拉丁文“electrum”。此后人类对电现象和磁现象的研究渐多。



图 2　番生簋铭文中的“電”字（左起第 4 列第 1 字）

电工程（简称电工）发源于 19 世纪中叶。19 世纪初，意大利物理学家 A. 伏打（A. Volta）发明了伏打电堆，即电池，第一次为物理学家提供了产生持续电流的电源，极大地促进了电磁学理论的发展。在电磁学理论的指导下，电磁现象的应用也迅速发展。从 1835 年发明电报开始到 20 世纪初，电话、白炽灯、发电机、电动机、变压器、供电线路、电子管相继发明。人类获得了新的动力和通信手段，电力可以远距离输送，通信几乎可瞬间地完成，一个新的电时代取代了蒸汽时代。电工程于是诞生了。

电能是应用最普遍的、最大的二次能源。它渗透到各个产业部门和日常生活。经过一百多年的发展，由于电工材料工业、电机电器制造工业和电力系统自身技术的不断进步，现在大电力系统已形成一个复杂的大系统。随着自动控制理论、计算机技术等的进展，电力系统正向新能源



图 3　中国神话中的电母

发电和智能电网方向发展。

早期的电工（electrical engineering）一词，既包括电机电器制造、电力的产生和传输及利用等方面，又包括通信、电子技术等方面。约在第二次世界大战结束以前，中国称电工程为电机工程。二次大战结束以后，电子技术有了划时代的进步，1946年制成第一台电子计算机，1947年制造出晶体管，1959年出现了集成电路。由电工一词乃衍生出了电子工程（electronic engineering）一词。

本卷介绍的电工技术基础知识包括：电磁场、电路、电子器件、电子电路、电磁测量、电工材料、高电压技术、自动控制理论和计算机九个部分。

电　磁　场

电磁场是以**电场强度**和**磁通密度**表征的一种物理场。电磁场具有能量、动量和质量，它是一种特殊形式的物质。物理学中的场，是指空间每一点被赋予的物理量的全体。对电磁场来讲，空间各处的电场强度、磁通密度都是矢量，所以电磁场是矢量场。电磁场对电荷、电流有作用力，这种性质被用来制造电动机、机械式指示电表、粒子加速器等。导体在磁场中运动能激起感应电动势并可以产生**电流**，这种性质被用来制造发电机、磁流体发电装置等。电磁场能够以波的形式在空间传播，这种性质被用来制造广播、电视、无线电通信设备等。

对电磁场认识的历史回顾　人类很早就接触到电磁现象，对电磁场的认识经历了漫长的岁月。远古时代，人们已看到了自然界的雷电现象。至于磁现象，人类最初接触到的是天然磁石。早在公元前4世纪至3世纪中国出现的《管子》一书中，已有关于磁石吸铁的记载。可是直到18世纪30年代才确定了只有正、负两种极性的电荷，1785年才第一次发现了关于电荷力的定量定律，即以法国物理学家C.A.库仑（C.A. de Coulomb，1736—1806）的姓氏命名的库仑定律。库仑还证实了两个磁极间的作用力也遵循类似的定律。

相隔一定距离的两个带电体或两个磁极之间，有着吸力或斥力。拖动重物时，人们靠绳子把力传给重物。可是电力或磁力似乎不要任何中间介质来传递。不凭借中间媒质的作用，一个带电体（或磁极）可使处在一定距离之外的另一个带电体（或磁极）受力的观点，是“超距作用”的观点。

英国物理学家M.法拉第（M. Faraday，1791—1867）却持另一种看法。他认为在两个带电体或磁极之间的空间里，充满着一种处于紧张状态的媒质。他根据两个磁极之间的铁屑会排成规则线状的现象，提出了“力线”的概念。他认为空间充满了力线，力线终止于带电体或磁极上。他还想象力线类似橡皮筋，当它们处在紧张状态时，沿力线方向有张力，垂直于力线方向有压力。正是力线使带电体或磁极受力。法拉第摒弃了“超距作用”的观点，他以充满空间的力线的形式，第一次提出了场的思想。只要把力线换成空间各处的场量，就得到了关于电磁场的思想。直到现在，力线仍是研究电磁场的一种手段。

英国物理学家J.C.麦克斯韦（J.C. Maxwell，1831—1879）继承、发扬了法拉第的思想。麦克斯韦把电磁作用归结为力线的作用。他用数学公式描述了法拉第提出的力线思想。他认为电场变化会形成电流——**位移电流**，从而预见到电磁波的存在，波以光

速在空间传播，光也是电磁波。这样，他把光和电磁波统一起来。1864 年，他在论文《电磁场的动力学理论》中，将电磁场的变化规律总结为**麦克斯韦方程组**。他提出的理论当时并没有立刻被人接受。直到该理论提出 20 多年后的 1887～1888 年，德国物理学家 H. R. 赫兹（H. R. Hertz，1857—1894）用实验方法产生出电磁波，并证明它以光速传播，关于电磁场的理论才得到了实验的证实。在广播、电视、通信等领域，电磁波得到了广泛的应用。光从地球传到火星的时间约 3min。从地球向火星发射电磁波后，即使立刻关闭发射装置，电磁波仍然存在并能传播到火星探测器上去。

图 4 为 1851 年中国宁波出版的第一本中文电磁学著作《博物通书》的封面和一些文字说明和插图，该书由美国传教士、西医士 D. J. 玛高温（D. J. MacGowan）译述，汉语词“电气”就源于该书。

电磁场分类 电磁场可分为**静电场**、**恒定电场**、恒定磁场和时变电磁场。

静电场：存在于静止电荷或**驻极体**周围的、不随时间变化的电场。

恒定电场：导体内有恒定电流时，存在于导体及其周围的、不随时间变化的电场。

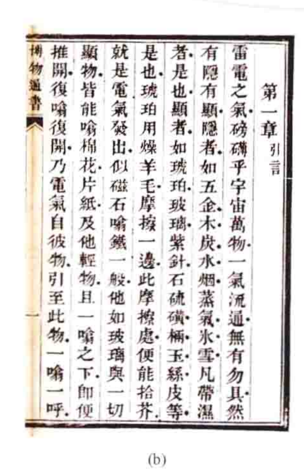
恒定磁场：存在于恒定电流或永久磁铁周围的、不随时间变化的磁场。

时变电磁场：随时间变化的电磁场。即使激发它的电荷被中和，它仍可存在。

介质对电磁场的影响 物体由原子构成。原子核带正电荷，绕核旋转的电子带负电荷。深入到原子的微观领域，看到的是不连续分布的电荷和电荷的运动。原子的直径大约为 10^{-10}m。设想用某种实验装置的探头测量电荷，即使探头的直径小到 10^{-4}m，它也是原子直径的百万倍。用这种装置测到的最小电荷，也要包含亿个以上的带电粒子。应用这种装置从宏观的角度研究电现象时，观察不到运动着的、作不连续分布的带电粒子这样的微观现象，只能观察到它的统计平均效应。因此，可以认为电荷是连续分布的，可以认为有不带电的物体等等。可是，从物质的微观结构看，却有**电荷**、电流（运动着的电荷）存在。当物体受外界电场、磁场作用时，由于物体自身具有的电磁特性，物体

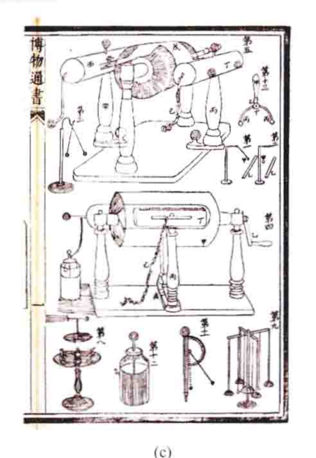

咸豐元年正月鐫
真神堂在寧城西門紅橋頭
耶穌會堂在東門内大街上
博物通書
西醫士瑪高溫譯述
耶穌降世一千八百五十一年

(a)

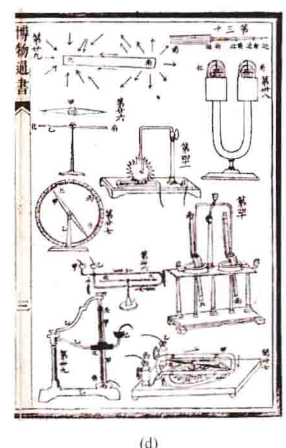

第一章 引言
雷電之氣磅礴乎宇宙萬物一氣流通無有勿具然有隱有顯隱者如五金木炭水烟蒸氣氷雪凡帶濕者是也顯者如琥珀玻璃紫針石硫磺樠玉絲皮等是也琥珀用燥羊毛摩擦一邊此摩擦處便能拾芥就是電氣發出似磁石噏鐵一般他如玻璃與一切顯物皆能噏棉花片紙及他輕物且一噏之下即便推開復噏復開乃電氣自彼物引至此物一噏一呼

博物通書 一

(b)



(c)



(d)

图 4 中国第一本中文电磁学著作《博物通书》（雷银照 提供）

(a) 封面；(b) 静电现象文字描述；(c) 静电现象插图；(d) 磁现象插图

会反过来影响原来的电场、磁场。从宏观的角度来处理这种影响时，往往用表征介质（材料）电磁性能统计平均效应的一些参数来考虑这种影响。**电容率**、**磁导率**就是这些参数的例子。这些参数的值通常由实验确定。有些介质是各向同性的，有些介质是各向异

性的。例如有取向的冷轧硅钢片，顺着轧制它的方向材料的导磁性能好，垂直于轧制它的方向导磁性能差，这种材料就是各向异性的；用它制造变压器的铁芯时，必须沿轧制方向将硅钢片切成长条。反之，在任何方向上，介质的电磁性能相同，这种介质是各向同性的，无取向的硅钢片属于这类。

电　路

电路是电流可在其中流通的由导体连接的**电器件**的组合。根据一定的目的，把所需的器件，用导线相连即组成电路。电路是电力系统、控制系统、通信系统、计算机硬件等电系统的主要组成部分，起着电能和电信号的产生、传输、转换、控制、处理和储存等作用。例如，在电力系统中，发电机通过汽轮机或水轮机把热能、核能或水能转换成电能后，通过变压器、输电线把电能输送给用户；用户的电动机、电灯、电炉等便可将电能转换为所需的机械能、光能、热能等。供给电能的设备称为电源，用电的设备称为负载。

电路理论　研究电路的基本规律及其计算方法的理论，与**电磁场**理论同属电工技术的重要理论基础。电路理论的研究对象是电路中发生的以电流、**电压**、电荷、**磁通量**等物理量来描述的电磁现象和过程。

在电路理论中，对组成电路的各个器件，只考虑它们的端电流和端钮间的电压，即只考虑它们的外部表现，一般不涉及内部发生的物理过程。例如，对一个具体电源，在电路理论中只关心它端钮上的电流和电压，并不关心其内部产生**电动势**的机理。

电路模型和电路元件　在电路理论中所称的电路和实际电路有区别。实际电路由实际器件组成；电路则由实际器件的模型组成。实际器件虽然繁多，但它的模型可由为数不多的电路元件来组成。电路元件包括有**电阻**、**电感**、**电容**、**电压源**、**电流源**、**受控源**、耦合电感、**理想变压器**等，而且都具有明确的数学定义。因而，器件用模型表示后，就可用数学方程来描述。电路理论中所讲的电路都是由电路元件组成的。

同一器件，因工作条件、精确度要求、选用的分析方法等的不同而可能具有多种不同的模型。例如，一个线圈（电感）可以用电感元件或电阻元件和电感元件的串联作为模型；直流发电机可以用直流电压源、直流电压源和电阻元件串联、直流电流源和电阻元件并联作为模型。

为器件建立模型常需借助于电磁场理论、半导体器件理论等有关学科的理论。

电路元件也可用图形符号表示。采用图形符号并结合原理性电路图可得出表征电路主要特性的电路模型，成为对电路做定量分析的出发点。对一个由电池、照明灯、开关和连接导线组成的实际电路，可画出如图 5（a）所示的原理性电路图，再得到如图 5（b）所示的电路模型。电路模型中串联的电压源 U_S 和电阻元件 R_S 系电池的模型，电阻元件 R_L 系灯泡的模型，导线的电阻则忽略不计。

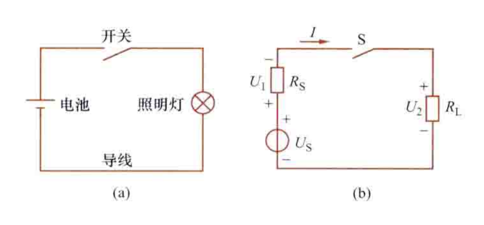


图 5　小电珠照明电路
（a）原理性电路图；（b）电路模型

电路分析和电路综合　电路理论包括分析与综合两大分支。电路分析的任务是在给定电路的结构和元件参数的条件下确定电路的工作状态；电路综合的任务是在给定电路工作状态的条件下

确定电路的结构和元件参数。电路理论常专指电路分析这一分支。

在电路分析中需列出电路方程和求出方程的解。电路方程可由两类方程列出：一类是由电路的支路、节点情况列出的**基尔霍夫定律**方程，常称为拓扑约束；另一类是表征各电路元件特性的方程，常称为元件约束。

为简化电路的分析、计算，在基尔霍夫定律和元件电压、电流关系的基础上发展了一些常用的基本分析方法，如**支路电流法**、**节点法**、**回路法**和**表格法**等。运用**网络图论**可得出分析电路的系统化步骤、方法，便于用**计算机**求解。

电路的基本性质是由一些电路定理体现的。重要的定理有：**叠加定理**、**特勒根定理**、**替代定理**、**互易定理**、**戴维南定理**、**诺顿定理**等。它们常被用来简化电路的分析、计算。

电路分类 按不同的分类方法，电路主要有：集总参数电路和分布参数电路、电阻电路和动态电路、直流电路和交流电路、正弦电流电路和非正弦周期电流电路。

集总参数电路和分布参数电路 当电路的尺寸远小于其最高工作**频率**所对应的波长时，电路称为集总参数电路，又称集总电路。否则称为分布参数电路，又称分布电路。

中国电力系统的工作频率 f 为 50Hz，对应的波长 $\lambda=c/f\approx6000$km（c 为**电磁波**的传播速度），因此在这种频率下工作时，厂房和实验室内的电工设备完全可按集总电路处理。电力传输线长度即使达到 100km，也还是可作为集总电路来处理。由于集总电路尺寸远小于波长，因而电磁波从电路的一端传播到另一端可认为是瞬间完成的。在集总电路中，电压、电流仅是时间 t 的函数。

相反地，对无线电调频接收机来说，若所接收的信号频率为 100MHz，则对应的波长$\lambda=c/f\approx3$m，连接于接收天线与接收机之间的传输线，即使只有 1m 长，与波长也属同一数量级，不能作为集总电路处理，而应作为分布电路处理。在分布电路中，电压、电流将是时间 t 和空间坐标 x 的函数。

电阻电路和动态电路 根据电路所含元件的特点而划分的两大类电路。

电阻电路。由电阻元件、受控源等元件及电压源和（或）电流源组成的电路。这类电路又称无记忆电路，电路中的**响应**只与同一时刻的**激励**有关。在这类电路中表明各电压、电流之间关系的电路方程是代数方程。运用支路电流法、节点法、回路法等基本方法对电路分析时只涉及代数方程的求解问题。

在电阻电路中除电压源、电流源外，若所有元件都是线性的，则称为线性电阻电路，否则，便称为非线性电阻电路；若所有元件都是非时变的，则称为非时变电阻电路，否则，便称为时变电阻电路。例如，含二极管的电阻电路属非线性非时变电路。

动态电路。至少含有一个动态元件的电路。动态电路在任一时刻的响应与电路过去的历史情况（过去的激励和连接情况等）有关，因此又称记忆电路。在这类电路中表明各电压、电流之间关系的电路方程是微分方程，运用各基本方法对电路进行分析时涉及微分方程的求解问题。

在动态电路中除电压源、电流源外，若所有元件都是线性的，则称为线性动态电路，否则便称为非线性动态电路；若所有元件都是非时变的，则称非时变动态电路，否则称为时变动态电路。例如，含铁芯线圈的电路属非线性非时变电路；若铁芯线圈中的铁芯

作机械移动，使电感随时间而变化，则属非线性时变电路。

直流电路和交流电路 根据电路中电流的特点而划分的两类常见电路。

直流电路。电压、电流不随时间变化的电路。例如，直流激励下的非时变电阻电路。

交流电路。电压、电流随时间作周期性变化的电路，一般工程上也常指正弦交流电路。

正弦电流电路和非正弦周期电流电路 交流电路中按电流波形而划分的两类电路。

正弦电流电路。电压、电流随时间作同频率正弦规律变化的电路。这是电力系统中大量遇到的电路。求解这类电路的基本方法是**相量法**。根据作用在电路中的电源相数又可分为单相电路、三相电路等。

非正弦周期电流电路。电流具有非正弦周期特点的电路。例如正弦波的整流电路；非正弦电源作用于铁芯线圈的电路，都是属于这类电路。

电 子 器 件

电子器件是利用和控制电子在真空、气体或**半导体**中的运动来实现电传导的一种器件。用它来实现**电子电路**中特定的功能，如信号的提取、放大、整形和传输，生产过程的自动检测、自动控制和保护等。器件的不断更新换代往往会给电子电路的功能带来极大提高，甚至引起**电路功能**的革命性变化。电子器件包括**真空电子器件**、充气电子器件和半导体器件。

简史 电子器件的发展经历了真空电子器件（含充气电子器件）、微电子器件和**纳电子器件**三个时代。1906 年，第一支真空三极管诞生，这是人类获得的第一个电子信号放大器件，这种真空电子器件被称为真空电子管，简称**电子管**。为了使器件趋向小型化，20 世纪中期出现了微型电子管。1948 年发明了第一支晶体管，由此发展起半导体器件，又称固体器件。从 1958 年第一块半导体**集成电路**诞生以来，经过 50 多年的发展，集成电路的规模越来越大、体积越来越小、速度越来越快，且功能越来越强。无论是 1948 年的晶体管还是超大规模集成电路都以半导体 PN 结为基础，没有本质上的区别，通称为微电子器件。当微电子器件的特征尺寸从微米级减小到纳米级（100nm 以下）时，以硅为主的集成电路面临很多技术障碍；当器件的特征尺寸降到 10nm 时，达到了微电子器件的物理极限，从而迫使人们研究新理论、新材料和新工艺，由此出现了纳电子器件。对纳电子器件的研究可追溯到 20 世纪 80 年代，进入 21 世纪以来获得了更大的发展。

分类 主要分为真空电子器件、充气电子器件和半导体器件三大类。

真空电子器件。按结构不同可分为真空二极管、真空三极管和真空多极管等；按功能不同可分为放大管、**阴极射线示波管**、**微波电子管**、**电子束管**等。

充气电子器件。按结构和所充气体不同，可分为冷阴极放电管、热阴极放电管和汞弧整流器等。

半导体器件。常用半导体器件的材料是硅、锗或**砷化镓**。按结构不同可分为**半导体二极管**和**半导体三极管**；按导电机理不同可分为单极型晶体管和双极型晶体管；按功能不同可分为普通二极管、特殊二极管、微波晶体管、低噪声晶体管、光电器件等；按频率范围不同可分为高频管、低频管等；按输出功率不同可分为小功率晶体管和大功率晶

体管，如绝缘栅场效应功率晶体管、晶闸管等；按单个器件与元件连接还是把晶体管与元件制作在一块基片上可分为分立器件和集成电路；按器件的特征尺寸和工作机理可分为微电子器件和纳电子器件。

特点 电子器件类型繁多，机理各异：真空电子器件是把器件的电极（如阳极、阴极、栅极等）封装在抽成真空的玻璃（或金属）管壳内的器件，也称为真空管。充气电子器件是先把管内抽成真空，然后再充入适当的惰性气体，所以又叫充气管。这两种器件都是利用外加电压的电场作用，控制带电粒子在真空或气体中的运动规律，具有非线性的伏安特性和单向导电的特性。半导体器件是由半导体材料（如硅、锗、砷化镓、磷化镓等）制成。依靠载流子（空穴和电子）在固体材料中运动，具有非线性的伏安特性，大都具有单方向导电特性，与真空器件相比，有体积小、重量轻、功耗低、寿命长等特点。因此半导体器件是发展最迅速、更新最快的一种器件。

应用 电子器件在电子电路中的作用是对电压和电流进行控制、变换、传输或产生。由于电子器件的各自特点，应用场合也就不同，如半导体器件从分立器件向集成电路发展和大功率发展，已逐步取代了真空管的许多应用领域，但是在特高频率或特大功率的应用场合，仍需采用真空电子器件如电子束管、微波管等。充气电子器件过去用于中、大功率的电子电路中，现已很少应用。

应用电子器件时应注意各种器件的电性能参数和耐恶劣环境的性能。

展望 近年来，电子器件的一个重要进展是纳电子器件，其工作机理依赖于器件的量子效应，如隧穿效应、库仑阻塞效应、干涉效应等。纳电子器件具有更高的响应速度和更低的功耗，可以从根本上解决日益严重的功耗问题。由于器件尺度为纳米级，集成度大幅度提高，同时还具有器件结构简单、可靠性高、成本低等诸多优点，因此，纳米技术将电子工业推向一个更高的发展阶段。

电 子 电 路

电子电路是由电子元件和电子器件组成的电路。电子器件包括电子管、晶体管、场效应管以及各种类型的集成电路芯片。

1906 年美国的 L. 德福雷斯特（L. De Forest）发明了三极电子管，出现了含电子管组成的电子电路。1948 年美国的 W. B. 肖克莱（W. B. Shockley）、J. 巴丁（J. Bardeen）和 W. H. 布拉顿（W. H. Brattain）发明了晶体管，使电子电路从电子管电路发展为晶体管电路。1958 年美国制成了第一块集成电路，使电子电路从晶体管电路发展为集成电路。1967 年研制成大规模集成（LSI）电路，1978 年研制成超大规模集成（VLSI）电路，从此，电子技术进入了微电子技术时代，使电子电路及其电子产品向微型化、系统集成化发展。随着大规模集成电路的出现，电子电路的设计中开始采用计算机辅助分析与设计。

分类 电子电路有多种分类方法。按信号的特点可分为：模拟电子电路和数字电子电路；按频率高低可分为：低频电子电路和高频电子电路；按电子器件的工作状态可分为：线性电子电路和非线性电子电路；按功能不同可分为：整流、滤波、振荡、放大、调制、计数电路等。

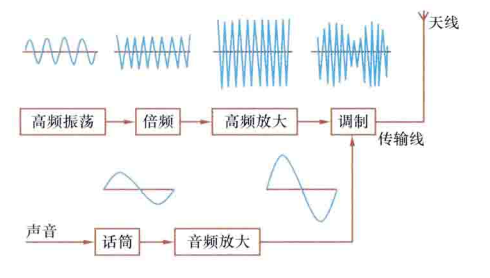


图6 广播发射机的方框图

模拟电子电路。依靠电压对时间的连续变化来运载信息的信号叫模拟信号，例如音乐、语言变换为电信号后都是模拟信号。处理模拟信号的电子电路称为模拟电子电路，例如，图6所示为广播发射机的方框图。

数字电子电路。依靠电压对时间的断续变化来运载信息的信号叫数字信号。处理数字信号的电子电路称为数字电子电路，例如计数器电路。数字信号可以由模拟信号转换过来，而数字信号也可以转换为模拟信号，如图7方框图所示。图中的两个圆圈代表两种信号（数字和模拟），在两者之间的方框表示模拟信号转换成等效的数字信号形式（A/D是**模数转换器**）或数字信号转换为相应的模拟形式（D/A是**数模转换器**），其余的部分包括信号的输入和输出。

低频电子电路。传送、控制和处理低频信号的电路。语言、音乐、报警信号均属低频信号。如图6广播发射机的方框图中，声音的变换与音频放大这一部分电路就是常见的低频电子电路。

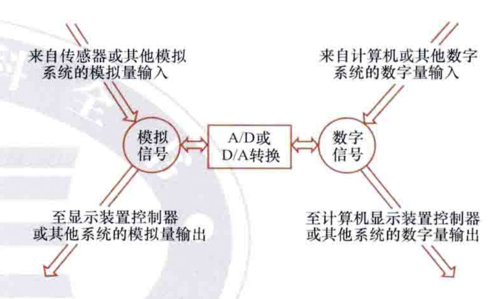


图7 信号处理系统的方框图

高频电子电路。传送、控制和处理高频信号的电路。如图6广播发射机的方框图中的高频振荡、倍频、高频放大与调制电路都属高频电子电路。

线性电子电路。由于输入信号足够小，电子器件工作于特性曲线中的很小部分，故特性曲线可用其切线代替，即近似工作于线性部分的电子电路。例如各种小信号**放大电路**就是线性电子电路。

非线性电子电路。由于输入信号幅度较大，电子器件工作于特性曲线的饱和或截止部分的电子电路。如**触发器**、**比较器**电路等。

应用 电子电路能实现多种特定的功能。它被广泛用于各种电子设备和电子系统中，如通信系统、测量系统、广播电视系统、计算机系统、自动控制系统等。电力系统中也大量使用电子电路。

在通信系统中的应用。对于一个通信系统，输入信号可以是语言、音乐或者**数据**，输入信号产生于某一地点，经过长距离有效的传送，然后在接收地点还原为原来的信号。例如图6的广播发射机就是一个通信系统的发射部分。该图中高频振荡器的作用是产生高频振荡电压，这种高频电压波是用来运载声音信号的，称为载波。而高频振荡器所产生的电振荡的频率不一定恰好等于所需要的载波频率，它的电压一般也比较小，需要用倍频器把频率提高到所需要的数值，再用高频放大器放大到一定的强度，以推动**调制器**。调制器是综合调制信号和载波的一种电路，如广播电台中常用的调幅广播，是将音频信号“装载”到高频振荡的幅值中去，然后由发射天线传出。

在测量系统中的应用。对于一个测量系统，从传感器中得到被测物理量的电信号，经过处理把这个被测信号显示或记录下来。如图8所示的数字温度计，从热电偶来的模拟信号先被放大，经过线性补偿，再转换为数字信号，被测物体的温度最后就由数字显

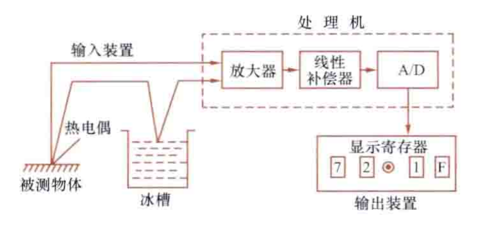


图 8　数字温度计方框图

示装置显示出来。

电子电路的计算机辅助分析与设计　由于计算机技术和软件开发工作的进步，使电子电路的分析与设计可借助计算机实现。

SPICE（simulation program with integrated circuit emphasis）是一种通用电路模拟程序，1975 年由美国加利福尼亚大学伯克莱分校的 Donald Pederson 在电子研究实验室首先建立，随后推出了各种商用版本的 SPICE 软件，1984 年推出了基于 SPICE 的微机版 PSPICE（personal SPICE）。应用 PSPICE 软件，可根据电路的结构和元器件参数，对电路进行仿真，获得电路的技术指标，从而可以较快和方便地评价电路设计的正确性，并可节省大量的时间和费用，同时，还可以进行传统方法难以实现的容差分析、灵敏度分析、最坏情况分析、温度特性分析等，进一步提高电路设计的质量。

EWB（electronic workbench）软件是 Interactive Image Technologies Ltd. 在 20 世纪 90 年代初推出的电路仿真软件，比较小巧（只有 16M），但对模拟和数字电路的混合仿真功能却十分强大，它提供了万用表、电压表、电流表、示波器、信号发生器、扫频仪、逻辑分析仪、数字信号发生器、逻辑转换器等仪表。界面直观，易学易用。

对基于**复杂可编程逻辑器件**（CPLD）和**现场可编程门阵列**（FPGA）的数字电路设计和分析，可利用各 PLD 器件生产厂家提供的开发软件比如 Quartus、ISE、ispLEVER 等实现电路的设计、仿真。利用**硬件描述语言**可实现复杂数字电路设计，采用在系统编程技术，给电子产品的设计和生产带来许多革命性的变化，已发展到电子设计自动化（electronic design automation，EDA）的高级阶段。

发展趋势　电子技术发展异常迅速。微细加工技术的进步对信息电子技术产生巨大影响。就电子电路而言，正沿着以下三个方向发展：继续缩小器件的特征尺寸，将会使其工作速度提高、功耗降低，集成度提高、单元功能的价格降低，从而，提高电路系统的性能和性能价格比；系统集成芯片（system on chip，SoC）从整个系统的角度出发，把处理机制、模型算法、软件（芯片上的嵌入式操作系统）、芯片结构、各层次电路元器件的设计方法紧密地结合起来，在单个芯片上完成整个系统的功能，实现更高性能的系统指标；微电子技术与其他领域相结合将诞生新的技术交叉点。典型的例子就是微电子机械系统（micro electro mechanical systems，MEMS），它用微电子技术和微加工技术相结合的制造工艺，制造出各种性能优异、价格低廉、微型化的传感器、执行器、驱动器和微系统。MEMS 技术将成为下一代半导体主流技术。

电　磁　测　量

电磁测量是对表征电和磁的各种物理量的测量。在电力产生和电工制造领域，广泛用于检查或确定系统、设备、元器件、材料等的工作状况和性能。

电磁测量的对象是电学量和磁学量。电学量包括电参量（如电压、电流、**频率**、功率、电能、相角、**功率因数**等）和电参数（如电阻、电容、电感、电阻时间常数等）；其中电压、电流是基本量，其他量常可通过它们而间接得到。磁学量包括磁通量、磁通密度、**磁动势**、**磁场强度**、磁导率等，其中磁通密度和磁场强度是基本量。

测量包括监测、检测、工业测试和精密测量，后两者要求获取符合准确度要求的被测对象数据。为此应当：选择合宜的测量方式和方法；选用适当的测量仪器仪表；分析测量误差来源，采取减小测量误差的措施。

测量方式 有直接测量、间接测量、组合测量和软测量。直接测量：即被测对象可由测量仪表直接读得，如由电压表的刻度或显示直接读出被测电压值；间接测量：指被测对象要通过若干由直接测量获取的数据，经明显的函数关系得到，如由直流电压表和电流表的示值计算功率或电阻值等；组合测量：它获取数据的方式与间接测量相同，但要解方程组才能得到被测对象的量值，如测量电阻的温度系数等；软测量：通过较复杂甚至相当复杂的计算来完成对被测对象量值的估计，具体是选择与被测对象即被估计变量相关的一组可测变量，并构造某种以可测变量为输入、被估计变量为输出的数学模型，进而借助计算机及软件，尽可能准确地估计出被测对象的量值。

测量方法 大致分为直读法和较量法两类。

直读法 指被测对象可由一台仪表（直接测量）或几台仪表（间接测量）的示值直接或间接获取。这些仪表已事先用标准量进行过标定，故实际测量过程中，标准量并未直接参与，类似用弹簧秤称重的情况。

较量法 指在测量即比较过程中，被测对象与作为标准量的标准器件直接进行比较，如用天平称重，砝码就是标准器件。较量法主要包括零值法、差值法和替代法。

零值法：在比较过程中，当被测对象与标准量相等，或满足一定条件时，检测仪表指零。平衡状态下的电桥和电位差计即属于这种情况。此法依赖标准器件具有的高准确度，检测仪表的高灵敏度，能得到十分准确的测量结果。

差值法：在比较过程中，并未达到平衡状态。这时是利用标准量与测得的差值之代数和来求取被测对象的量值。如差值很小，仍能得到准确的测量结果。如将被测直流电压与一标准电压对接，测两者的差值；如此，标准电压与此差值的代数和即为被测电压的值。

替代法：先用仪表或仪器测量被测对象，记下仪表的示值或仪器的工作状态，然后用相同性质的标准量代替前者，调节标准量，使仪表的示值或仪器的工作状态同前，则标准量即与被测对象相等。理论上，测量结果只决定于标准量的误差。

测量仪表 分为模拟式仪表与数字式仪表两大类。

模拟式仪表 根据经典电磁测量原理制成的电表和仪器，又称经典式仪表。包括直读式电表、较量仪器及记录仪表等。

直读式电表：又称机械式指示电表。被测电参量加至电表的测量机构，将产生力矩，驱使测量机构的可动部分带动指针或光标在标度盘上偏移。由对应于偏移的标度可读出被测对象的量值。这种电表能反映被测对象的缓慢连续变化。根据产生力矩的原理，机械式指示电表包括磁电系、电磁系、电动系、感应系、静电系等类型。

较量仪器：由高准确度元器件组成的测量仪器，用于实现被测对象与标准量的直接比较。有时也将标准量装在仪器内，如测电阻的惠斯登电桥、开尔文电桥，测阻抗的各种交流电桥和测电压的电位差计等。较量仪器一般比直读式电表有更高的准确度。

记录仪表：包括用于记录或显示电压、电流、功率等的波形或动态变化过程的仪表，

如自动平衡式记录仪、直接驱动式记录仪表和反映两变量间函数关系的 x－y 记录仪等。它们将被测电学量的变化转换为机械运动轨迹，并描绘在记录纸或胶片上，但只能记录较低频率或缓变信号。记录仪表还包括随时间对被测对象量值进行累计的仪表，如电能表、多费率电能表、最大需量表、无功电能表、直流电能表等。

数字式仪表 这类仪表的工作原理与模拟式仪表不同。对稳定幅值的被测对象，通过模数转换，将被测对象的幅值量化为离散形式的数据，经处理后，以数字方式加以显示。对随时间变化的量，或先将其调理为稳定幅值的量，或利用采样-保持环节，先将该量沿时间轴离散化为不同幅值的量，再对每一离散幅值进行量化，又经综合处理后，以数字形式显示。

在电子、半导体、计算机等技术飞速发展的支撑下，数字式仪表可做到准确度高、测量速度快，便于记录、储存和与计算机相结合，能有效扩大测量功能等。已研制出体积不大、性能良好、能测量多种电学量和磁学量的多功能数字式仪表，其中测量电学量的精密数字仪表的准确度很高，已代替精密的模拟式标准仪表。数字式仪表具备一般模拟式仪表难以甚至无法实现的功能，在很多测量领域已完全代替模拟式仪表。

测量误差 由于测量方法的不完善，或所用仪器仪表和标准器件不够准确，或存在各种干扰因素等，测量结果中必然存在误差。

根据来源及变化特征，测量误差分为系统误差、随机误差和疏失误差。系统误差：在重复多次测量同一个量时，保持不变或按一定规律变化的误差；随机误差：在重复多次测量同一个量时，以随机方式出现的误差；疏失误差：由测量实施者粗心大意引起的误差。

对于电力生产、电机与电器制造业，大部分测量结果中的主要误差是系统误差。首先要探究其来源，并确定其变化规律，然后选择合理有效的抑制或削弱措施。如直流电桥的桥臂中若存在热电动势，将引起系统误差，对此，可采取改变电桥电源极性、测两次数据取平均值的方法来消除它。又如直流电位差计的电源电压可能随时间呈线性变化，对此，可采用等时距对称法，即以某一时刻为中心，取在其之前和之后的等时间间隔的一些成对数据进行处理，理论上，在这些数据的平均值中已不存在线性变化因素所引起的误差。

不同的测量任务，有不同的准确度要求，亦即允许存在不同的误差。测量工作者应按允许误差来选择测量方法和相应准确级的测量仪器仪表，而不应盲目追求高准确度。

发展 起源于 19 世纪 20 年代，被称为经典的电磁测量技术，到 20 世纪中叶，已形成自身的科学体系，之后依然有不少令人瞩目的发展。如出现了成系列的变换器式电表，带感应耦合臂的变压器电桥，电流比较仪和将半导体器件结合到桥体内的有源电桥等。

20 世纪 50 年代，电磁测量技术及仪器开始进入到一个重要的发展阶段。数字电子技术的兴起，使电磁测量呈现出数字化趋势；1952 年出现了第一台直流数字电压表。随着半导体、计算机和集成电路制造等技术的发展，具有不同功能和高性能的各种数字式仪器仪表相继问世；测量对象也不断扩展到更多的非电量领域。20 世纪 80 年代以来，在微电子、计算机、多媒体、信号处理、数字通信以及网络等技术飞速发展的推动下，电磁测量技术与仪器仪表提高到智能化、微机化、网络化的高新水平。就仪器仪表本身

而论，开始是CPU或微处理器植入内部，使其越来越多的硬件环节由软件所代替；后逐渐发展呈现出以个人计算机为核心，由测量功能软件支持，具有虚拟控制面板、必要仪器硬件、信息处理能力和通信能力的虚拟仪器的特征；且通过模块化、标准化实现了系列化和通用化；并与监测、测试、数据采集、数据处理、自动调节、自动控制、自动校准等应用领域沟通，促进了电磁测量领域自动测试系统的实用化、通用化和统一化。

电力生产、电工设备制造等产业的发展及许多领域科学技术的进步，均对电磁测量不断提出新的要求，与此同时，许多学科领域在理论、方法、手段、材料等方面取得的新成就，也持续不断地丰富着电磁测量科学和技术的内容。如，电力系统规模日益增大，电压等级不断提高，就要求有能准确测量高电压、超高压、大电流、超大电流的新型仪器仪表。大功率非线性负荷迅速增加，如大容量电弧炉、电气化高速电动机车、直流输电、大功率交-直流电能的整流与逆变等，使电网中的谐波污染日益严重；高温超导技术已开始在电力系统节能降耗中发挥作用；智能电网、**物联网**、大规模清洁可再生能源接入电网、智能变电站的推广应用等。所有这些，都对电磁测量技术及仪器提出了新的需求，都期待适合完成相应被测对象测量的新型仪器仪表的出现。无疑，在这一过程中，必将会促使电磁测量理论和技术的继续发展。

电工材料

电工材料是用于电工领域中的各类材料的总称。根据它们的电磁特性可分为绝缘材料、半导体材料、导电材料和磁性材料四大类。此外，还包括其他一些结构材料和功能转换材料。

绝缘材料 电阻率很高，一般在$10^9 \sim 10^{19}\Omega\cdot m$范围内，用以限制传导电流并使电流按一定通道流动的**电介质**材料。绝缘材料中也会流通微弱的传导电流，其载流子在弱电场下主要为正、负离子，其电阻率随温度上升而呈指数式下降。绝缘材料种类繁多，按其聚集状态可分为绝缘气体、绝缘液体和绝缘固体三类。

绝缘气体。常用的有**空气**、氮气、**六氟化硫**等。一般绝缘气体除电气强度较低外，其他介电性能十分优良；而六氟化硫则具有较高的电气强度，现广泛用于高电压电力设备中。

绝缘液体。常用的有**矿物绝缘油**、**合成绝缘油**（如硅油、十二烷基苯、聚异丁烯、异丙基联苯等）、**植物绝缘油**（如大豆油类、菜籽油类等），在电工设备中起绝缘、冷却、浸渍填充、灭弧等作用。绝缘液体要求在电场及高温作用下稳定性好、闪点高、凝固点低和无毒。气体、液体有流动性，击穿后能自愈，但一般不能单独作绝缘介质用，须与固体联合使用，以固体作支撑。

绝缘固体。可分为无机和有机两大类。

电工中常用的无机绝缘材料有**电瓷**、**云母**、玻璃等。从组成来看，无机材料主要由硅、硼及多种金属氧化物组成，以离子型结构为主。无机绝缘材料的耐热性好，一般工作温度可以在180℃以上；稳定性好，耐大气环境老化、耐化学药品腐蚀及耐长期电场作用；但脆性强，其机械冲击强度差、抗张强度低。

有机绝缘材料有塑料、**橡胶**、纤维、油漆、薄膜、绝缘浸渍纤维制品、复合制品、胶粘带和层压制品等。有机绝缘材料一般为高分子聚合物，平均分子量在$10^3 \sim 10^6$之

间。有机绝缘材料的耐热性通常低于无机绝缘材料，但含有苯环、杂环和硅、钛、氟等元素的高聚物的耐热性则高于一般线链形高聚物，如聚四氟乙烯、聚酰亚胺、硅有机聚合物等，工作温度可达180℃以上。

高电气强度、耐高温、耐辐照、耐火、阻燃的合成高分子固体绝缘材料是当前与今后发展的重点。

半导体材料 从导电性来看，其电阻率介于绝缘材料与导电材料之间，一般为10^{-6}～10^{8}Ω·m。半导体的载流子为电子、空穴，其电阻率随温度上升而下降。绝大多数的半导体是固体而且是单晶体。纯净的半导体材料由于导电性能很差，没有实用价值；通过掺入不同浓度的微量杂质来控制其导电性，使半导体材料能制成各种器件，从而获得广泛应用。以硅为例，在其中掺入五价元素磷、砷、锑、铋等可制成N型半导体，N型半导体主要靠电子导电；如在其中掺入三价元素铝、硼、镓、铟等可制成P型半导体，P型半导体主要靠空穴导电。利用N型、P型半导体的不同组合，可获得整流和放大作用，制成二极管、三极管、稳压管和晶闸管等。非晶态半导体在静电复印感光膜及各种传感器中的应用日益广泛。

半导体材料的种类很多，一般可分为元素半导体如硅、锗，化合物半导体如砷化镓、硫化镉、氧化锌，固溶体半导体如镓、砷、磷，有机半导体如蒽、萘，玻璃半导体等五类。

半导体材料的**电导率**对外界作用因素如光、热、电压等的变化非常敏感，可利用其光电、热敏、压敏（对机械压力敏感）等效应而制成光敏电阻、热敏电阻、压敏电阻等元件。

氧化锌电压敏元件在电力系统中用作过电压保护；砷化镓在发展超高速半导体集成电路中起着至关重要的作用。

导电材料 指允许电流持续流通的材料。其电阻率很低，一般在10^{-6}Ω·m以下。导电材料的载流子有两类：一类是自由电子，如在铜、铝等金属材料中为自由电子导电，其电阻率一般随温度上升而上升；另一类是离子，如在酸、碱及盐类的溶液中为离子导电。电工中的应用以金属导电材料为主，要求材料的电导率高、机械性能优良、耐大气腐蚀性及机械加工性能好。

导电材料除常用的高电导率的铜、铝外，也包括高电阻率的铜合金、镍铬合金以及能导电的石墨等。铜、铝主要用于电线电缆的载流芯，电机、变压器的绕组导线，其他还有在开关设备中供电触头用的银、铜、铝复合材料。高电阻率导电材料主要用于制造各种电阻元件，如调节元件、电位器、传感元件等，要求抗氧化和耐腐蚀性好，温度系数小，机械强度高；还可用于发热元件，并要求材料在高温下有好的抗氧化能力，高强度及高电阻率，温度系数小。有较高电阻率的石墨，熔点高，润滑性好，用于制作电机的电刷、弧光灯的电极等。

磁性材料 具有铁磁性能的材料。根据组成可分为铁磁性材料和铁氧体两类。前者为金属，后者由氧化铁和其他金属氧化物的粉末压制成形并烧结而成。根据矫顽力大小可分为软磁材料和硬磁材料。

软磁材料。矫顽力小、**磁滞回线**窄、**磁滞损耗**小，在较低的外磁场作用下就能产生

高的磁通密度，当外磁场除去后，磁性基本消失。电机、变压器、继电器等电气设备中应用的硅钢片、铁镍合金、铁铝合金、软磁铁氧体等为软磁材料。

硬磁材料。矫顽力大、磁滞回线宽、磁滞损耗大，将外加的磁场去掉后，仍能在长时间内稳定地保持很强的磁性。微电机、扬声器、精密仪表等应用的铝镍钴铁系材料、硬磁铁氧体、稀土钴等都是硬磁材料。

近代高频技术发展十分迅速，铁磁性材料由于电阻率低，高频下**涡流损耗**太大，已不能适应需要。铁氧体的导电性能属半导体类，电阻率比纯金属磁性材料要高得多，因此在高频磁场中涡流损耗小，适用于高频电工设备。具有矩形磁滞回线的铁氧体可作为电子计算机的记忆元件和自动控制中的开关元件。有的磁性材料在外磁场作用下有**磁致伸缩**现象，可用来制造超声元件和机械滤波器等。

高电压技术

高电压技术是研究有关高电压的理论、实验、应用的电工技术。它研究在高电压作用下电介质的放电和绝缘性能，不同波形的高电压、大电流的产生及测试方法，过电压的产生机理和防护措施，高压静电场的计算和实测，强电磁环境及其保护，高电压的应用技术等。高电压技术所涉及的范围主要是在几十千伏至几兆伏电压下的一些技术问题。

发展简史 高电压技术最初是随着物理研究和输电工程的出现而发展起来的。应用高电压技术，德国物理学家 W. K. 伦琴（W. K. Röntgen）于 1895 年发现了 X 射线，英国物理学家 E. 卢瑟福（E. Rutherford）于 1911 年根据 α 粒子轰击金箔引起散射而提出了原子模型。不少高电压技术理论是以物理学家命名的，如**巴申定律**、**汤森放电理论**等。一些高电压试验设备也是以物理工作者命名的，如考克饶夫倍压装置、范德格拉夫静电发生器、**罗戈夫斯基线圈**等。高电压技术不仅在历史上与物理研究有渊深关系，还在高能物理、热核聚变和激光器等的研究工作中起到了重要的作用。然而，高电压技术作为一门与国民经济密切相关的技术科学，是随着输电技术的发展而蓬勃发展起来的。当 1891 年从德国劳芬（Lauffen）到法兰克福建造了长度为 170km 的 15kV 三相输电线时起，就开始了高电压技术在输电工程中的实际应用。为了增大输电容量和距离以及减少输电损耗，电力网不断提高工作电压。当输电线路电压超过 35kV 时，由于针式绝缘子的造价与电压成立方关系，此时就出现了盘形悬式绝缘子串。当线路电压上升到 110～120kV 时，电晕现象严重，于是在 1910～1912 年间美国 J. 皮克（J. Peek）等人研究了电晕损耗问题，并采用了直径较大的钢芯铝绞线以代替铜线。当电压上升到 200～220kV 时，由于绝缘子串上电压分布不均匀，需要采用均压环以改善绝缘子链的电压分布。到 20 世纪中叶之后，交流输电线路的额定电压达到了超高电压（330～750kV）的水平，80 年代达到了特高压（≥1000kV）的水平，21 世纪初中国建成了世界上首条正式投入工业运行的 1000kV 交流特高压输电线路。实际上，电力技术的发展是从直流电开始的。直流输电最早是由瑞士工程师 R. 舍里（R. Thury）开发的，1889 年在意大利安装，传输功率 630kW，输送距离 120km，电压为 14kV。1882 年在德国建成的 2kV、1.5kW、57km 向慕尼黑国际展览会的送电工程。随着三相交流发电机、感应电动机和变压器的迅速发展，发电和用电领域很快被交流电所取代。同时变压器又可方便地改变交流电压，

从而使交流输电和交流电网得到迅速的发展，并很快占据了统治地位。但随着20世纪70年代后高压大功率晶闸管的问世，直流输电进入了快速发展时期，21世纪初中国建成了世界上首条正式投入工业运行的±800kV直流输电线路。图9示出了苏联/俄罗斯历年输电电压的上升概况，由此可以看出这一时期工业先进国家的电力发展水平。中国自1949年以来，电力工业迅猛发展，输电电压上升的概况见图10。随着输电电压的提高，高电压技术获得不断发展而逐步形成一门独立的学科，并扩大了学科领域。

学科领域 主要包括：电介质击穿理论；高电压绝缘技术；电力系统过电压及其限制技术；高电压试验技术；强电磁环境及其防护技术。

电介质击穿理论 主要研究各种放电现象，分析在气体、液体、固体电介质中和电介质界面间的放电发展过程和击穿机理，研究绝缘材料的各种特性以及这些特性在一定环境条件下随时间的演变过程及老化机理。由于这方面的知识涉及物质的微观结构，故称为高电压技术的物理基础。到21世纪初，除了气体击穿理论比较系统外，固体电介质击穿理论和液体电介质击穿理论，还不完整。总的说来，电介质击穿理论离定量分析还有相当距离。

高电压绝缘技术 研究电力设备如变压器、电机、电容器、高压开关设备、电缆、绝缘子等的绝缘结构和试验。绝缘结构包括材料选用、结构设计和工艺过程三部分。材料选用需要材料科学和电介质理论的知识。结构设计需要计算、分析或测量复杂结构中电场及电位分布的知识。绝缘材料在制备工艺过程中要除潮、除气、除杂质，尤其要去除金属杂质，常用的手段是真空浸渍。对电力设备绝缘的试验，很重要的是在高电压下的试验。高电压试验可以分为两类：耐压试验和非破坏性试验。**耐压试验**是对设备施加较高的电压，直接检验绝缘承受电压的能力。由于所加电压较高，对于在击穿后无自恢复绝缘性能的电力设备，这是一种破坏性试验。非破坏性试验主要是指所加电压较低，通过测量绝缘电阻、电容比值、介质损耗角正切值、局部放电量等参数，间接判断绝缘状态的一种试验，又称预防性检查或绝缘诊断。正在发展的在线监测技术，是在设备不停电的情况下，经由各类传感器进行监测，并通过微机计算、分析、储存和报告绝缘状态，出现异常时则发出警报。

电力系统过电压及其限制技术 由于外部或内部的原因，有时电力系统的电压可瞬间或短时超过正常运行的最高电压，这种状态称为电力系统过电压。**过电压**可能会给电力设备的绝缘造成无可挽回的损坏，必须采取措施，防止它的产生或限制它的峰值。根据过电压的产生机理，可将过电压分为外部产生的过电压和内部产生的过电压两个方面：外部产生的过电压，也叫大气过电压。它由直接雷击或因雷击线路附近所产生的感应电

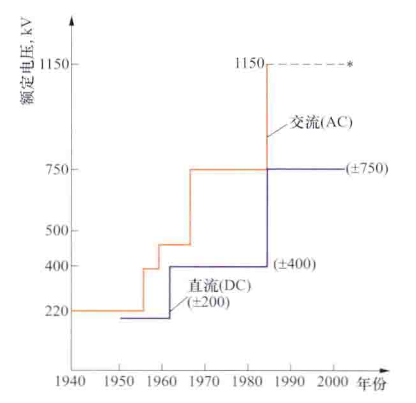


图9 苏联/俄罗斯输电电压上升概况
（1150kV试运行后又降压为500kV运行）
AC—交流；DC—直流

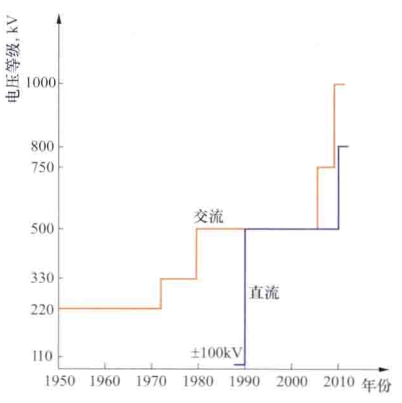


图10 中国输电电压上升概况

压所造成。这种过电压持续的时间（单次）一般为微秒级，称作雷电冲击。为了防止它的破坏作用，采取了输电线上装设架空地线和耦合地线、安装线路避雷器、降低杆塔的接地电阻，在变电站内装设避雷针和避雷器等措施。内部产生的过电压，称作内部过电压，其中包括操作过电压。操作过电压是由正常操作、故障或清除故障时系统过渡过程所造成的电压。这种过电压持续时间通常为毫秒级，它的峰值与运行电压相关，常以运行电压的若干倍来表示。它的波形与电力系统状态有关，而且多种多样。为了防止它的破坏作用，常用的限制其峰值的措施有：调整线路参数，装设并联电抗器，在操作断路器触头上装设并联电阻，装限压器等。

高电压试验技术 包括高电压和大电流的试验和测量技术两个方面。

为了检验电力设备绝缘在运行中的可靠性，需要能产生各种类型电压的试验电源，如交流试验变压器或串联谐振装置、直流高压发生器、冲击电压发生器等。还需要测量这些电压的装置，如各种高压电压表、各种高压分压器、高压技术中的数字测量系统和光电测量系统等。汇集各种高压测试设备的高电压试验室的规模、参数和设备内容，可以反映一个国家或一个单位的高电压技术水平。

对于电力系统中的断路器、避雷器等高压电器而言，除了耐压或放电试验之外，还需进行有关遮断电弧能力方面的试验。为此要研究电弧的特性和迅速熄弧的措施，还需要有大容量的交流电流试验设备，如冲击发电机、振荡回路、合成试验回路等。对于避雷器，还要研究雷电流通过时的许多特性，因此还需要具有能产生大冲击电流的冲击电流发生器和方波电流发生器等；相应地还需能测量冲击大电流的诸多仪器设备如分流器、罗戈夫斯基线圈等。此外，脉冲功率技术适应了技术物理、高能物理和新型加工的需要，对有关冲击电流的发生及测试装置，提出了更高的要求。

强电磁环境及其防护技术 主要研究强电磁场对人体健康的影响，对通信和电子设备及计算机等弱电装置的干扰，以及相应的防护措施。研究的课题有：电磁场的生理效应，高压设备及输电线所产生的电场和磁场，无线电干扰、电视干扰、可听噪声、静电感应，以及直流线路产生的离子流等。

应用与发展方向 高电压技术主要应用于电力系统和电工制造部门，实质是解决电力设备的绝缘问题。此外，它还在多个技术领域中得到了广泛的应用。它和静电技术的应用；放电效应的应用；高功率脉冲技术；电磁兼容等密切相关。

自动控制理论

自动控制理论是关于自动控制系统的构成、分析和设计的理论，亦称控制理论。系统，是由按一定的关系作用和制约的各个部分组成的具有一定功能的整体，有一定的边界将系统内部与系统外部（系统环境）区分开来。如果系统的组成部分本身也是系统，则称其为原系统的子系统，而原系统又可以是更大的系统的组成部分。这是系统概念的相对性或层次性。控制，是为了改善系统的性能或达到系统的目的，通过信息采集和加工而形成的施加在系统上的作用。自动控制系统，是代替或部分代替人的直接参与，使生产过程或其他过程按期望的规律或预定过程进行的控制系统。

自动控制理论是一门技术学科，而不是具体的工程实践。技术学科把工程实际中所用的许多原则加以整理和总结，使之成为理论，把工程实际的各个不同领域的共同性显

示出来，使得人们可能有更广阔的眼界用更系统的方法来观察有关的问题。自动控制理论不讨论系统元部件的详细构造和设计问题。系统与环境和系统各部分之间的联系是通过物质、能量或信息的传递来实现的，而信号是信息的载体。如，一台运行着的发电机，它的运行电压的高低以及高低的程度如何是一种信息，而它的运行电压值则是一种信号。自动控制理论主要研究自动控制系统中的信号的传输和变换与系统运动的关系。

在自动控制理论发展的早期阶段，它的主要应用领域是工程技术领域中的各类控制问题，尤其是生产过程、航空和航天技术、通信技术、武器控制等方面。20世纪70年代中期以来，自动控制理论的概念和方法已应用于交通管理、生态环境、生物和生命现象研究、经济科学、社会系统等领域。自动控制理论的建立和发展，不仅促进了自动控制技术向广度和深度的发展，也对其他邻近的科学和技术的发展，乃至人类的日常生活都产生着深刻的影响。自动控制理论被认为是20世纪在技术科学上所取得的重大成就之一，电力系统中如发电厂和变电站等广泛使用自动控制系统。

学科的基本内容和发展

经典控制理论 采用传递函数和频率特性描述，研究单输入单输出控制系统的控制理论。随着自动控制系统的建立，人们致力于研究有关的理论问题。19世纪60年代后期英国J.C.麦克斯韦（J.C.Maxwell）发表了第一篇自动控制理论的研究论文《论调速器》。随着研究工作的进展和成果的积累，到了20世纪20～30年代，这门学科诞生了。到40～50年代，这门学科成熟了。

现代控制理论 建立在状态空间法基础上的控制理论，可处理单变量系统和多变量系统、线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统、确定性系统和非确定性系统（包括随机系统和模糊系统）的问题。20世纪50年代开始研究，随着一批重要成果的取得，到1960年，这门学科形成了。

先进控制技术 继经典控制和现代控制之后发展起来的一类新型控制技术。随着科学技术的进步和工业生产、军事技术的发展，被控对象日益复杂，对控制质量的要求也日益提高。许多被控对象往往具有非线性和不确定性，难以建立精确的数学模型，有些对象甚至无法建模。这类先进控制技术包括鲁棒控制（如：H_∞控制）、智能控制（如，模糊控制、专家系统、神经网络控制）、预测控制和滑模控制等。

大系统理论 关于大系统的构成、分析和设计的理论，包括大系统的建模、模型降阶、递阶控制、分散控制和稳定性等内容。大系统一般是指规模庞大、结构复杂（环节多、层次多或关系复杂）、目标多样、影响因素众多且常带有随机性的系统。大系统理论在20世纪60年代中期萌芽，80年代初已形成为一门学科。

复杂系统理论 研究一类难以用现有科学方法解释的动力学行为系统的理论，是系统科学的延续和发展。复杂系统理论认为世界上所有事物都是自治系统，且同时隶属于一个高于其结构的更大系统。复杂系统理论的目的是揭示复杂系统（如工程系统、生命系统和社会系统）中利用现有科学方法和理论难以解释的某些动力学行为特性。典型的复杂控制系统有网络控制系统、混杂系统、混沌系统和生物系统等。

与邻近学科的关系

数学 数学对于自动控制理论学科极为重要，是主要的研究工具之一。自动控制理

论所要用的数学工具，随着所研究问题的不同，涉及数学的许多分支，如常微分方程、复变函数、线性代数、矩阵理论、数值分析、偏微分方程、泛函分析、概率论、数理统计、数学规划、运筹学、微分几何、模糊数学等。

计算机科学 计算机是生产过程自动化的主要工具。现代控制理论处理复杂的多变量控制问题，必须用计算机求解。复杂自动控制系统的组成，其核心是以计算机为主构成的控制器。生产过程的高度自动化，只有凭借计算机才能实现。大系统控制和系统工程的实施，也离不开计算机。

控制论 研究生命体、机器和组织的内部或相互间的控制和通信的科学，是20世纪最伟大的科学成就之一。N. 维纳（N. Weiner）和他的同事们将自动控制理论和通信理论中的基本问题加以综合，使之上升为一门独立的学科，并于1948年出版了奠基性著作《控制论》。钱学森创立了工程控制论，并于1954年出版了专著《工程控制论》。工程控制论是控制论这门学科中能够直接应用于工程设计的部分。其后，人们又先后建立了生物控制论、经济控制论、社会控制论、人口控制论等学科。控制论具有跨学科性，可以由功能类比的方法得到启发。如，生物控制论与人造系统控制论（包括工程控制论、经济控制论和社会控制论）之间存在着类比关系。自动控制系统、适应系统、自学习系统可与生物系统进行类比。

信息论 研究信息传输和信息处理系统中一般规律的新兴学科。自动控制理论则研究动态系统中信息（通过其载体信号）的传输和变换与系统运动的关系。

系统学 研究系统结构与功能（包括演化、协同和控制）一般规律的学科。1968年L. 冯. 贝塔朗菲（L. von Bertalanffy）出版了奠基性著作《一般系统论》。自动控制理论则是研究自动控制系统结构与功能规律的理论。系统学、一般系统论也有人称之为系统论，有一种提法，控制论、信息论和系统论是几乎同时兴起的一组综合性的横断学科。

控制论、信息论、系统学、数学和计算机科学的发展将影响和促进自动控制理论的发展。

计　算　机

计算机是一种按程序自动运行的现代化的信息处理机器系统，又称电脑。它由计算机硬件和计算机软件组成。它处理的对象是信息，处理的结果也是信息。计算机是脑力的延伸和扩充，是近代科学的重大成就之一。计算机基于存储程序来处理信息这一共性方法，决定了计算机应用的通用性和柔性。

发展简史 1946年第一台采用电子管的现代数字计算机在美国诞生。经过萌芽时期，到20世纪50年代，计算机走向实用化，从军用普及到民用，由科学计算扩展到事务处理。20世纪50年代是电子管计算机时期，这时的计算机还没有配操作系统。1959年到1964年是晶体管计算机时期，出现了操作系统初级阶段的管理程序。1964年后，进入了集成电路计算机时期，推出了可适用于科学计算、事务处理和实时控制的通用计算机。出现多道程序和分时操作系统。半导体存储器逐步替代了磁芯存储器，并且普遍采用了虚拟存储器技术。20世纪70年代中期，研制成现代巨型计算机，并行处理技术进一步发展。20世纪70年代初，4位微处理器芯片问世，到20世纪80年代末已发展到64位微处理器芯片，2000～2010年则发展到双核、多核微处理器芯片，极大地促进了微型

计算机的发展，计算机得以进入个人应用的广阔领域。20 世纪 80 年代初，出现了有专用图形处理硬件的**工程工作站**。精简指令集计算机（reduced instruction set computer，RISC）处理器的推出、并行处理技术的引入，使工程工作站的运算速度迅猛提高。1969 年末，第一个分组交换计算机远程网研制成功并开通，引起了 20 世纪 70 年代多种**计算机网络**体系的形成。70 年代中出现了网络操作系统和分布式操作系统。随着微机应用的不断扩展，出现了总线以太网。20 世纪 80 年代计算机摆脱单机运行而连成网络，或网络互连，实现计算机通信和资源的共享，并形成了多种网络的标准。20 世纪 90 年代及其后，超大规模集成电路的发展，**多媒体技术**、网络技术、**虚拟现实技术**、**面向对象技术**、并行处理技术、分布式处理的应用，以及计算机技术与通信技术的结合使计算机的发展进入一个新时代。

组成　计算机系统由计算机硬件系统和计算机软件系统组成。

计算机硬件系统：包括计算机本体及其外围设备，是计算机赖以工作的实体。

计算机本体由**中央处理器**、**主存储器**、**辅助存储器**、**输入/输出系统**等组成。中央处理器，包含**运算器**和**控制器**。运算器是对**数据**实行算术运算和逻辑运算的部件，控制器是解释指令码并控制其他部件协同操作的定时控制部件。主存储器，能由中央处理器直接随机读出或写入二进制信息的部件。辅助存储器，为弥补主存储器容量不足而设的与主存储器顺序成批交换信息的大容量存储器。输入/输出系统。电源，为计算机各部件正常运行提供能源的部件。

外围设备主要完成信息的输入、输出和成批处理的任务，是计算机和外界实现联系的设备。有**输入设备**、**输出设备**、外存储设备、**终端设备**和脱机设备。

计算机软件系统：各种程序和**文档**的集合，是用户与硬件之间的接口，担负着计算机系统运行的职能。它大致可划分为系统软件、支撑软件和应用软件三层。系统软件，位于计算机系统中最靠近硬件的一层、用以扩大系统功能供各种用户使用的软件。有操作系统、**汇编程序**、**编译程序**、网络软件以及各种服务程序等。支撑软件，为开发软件提供各种工具，如环境数据库、接口软件、网络软件和工具组。应用软件，特定应用领域专用的软件，如发电机的计算机辅助设计就是一种应用软件。

分类　计算机的种类很多，可按性能划分，也可按并行处理划分，还可按使用方式划分。

按性能分类：反映计算机性能的指标有主频（或运算速度）、字长、主存容量和编址空间、输入/输出（Input/Output，I/O）能力、**指令系统**、**数据类型**（定点、浮点、向量、数组）等。在性能上从高到低划分为：**巨型计算机**、**大型计算机**、**小型计算机**、工程工作站、**微型计算机**、**便携式计算机**。20 世纪 50 年代，受器件的限制，计算机不但体积庞大，而且用于科学计算的计算机和事务处理的计算机是分开的。60 年代中期，采用集成电路才把两者的功能结合起来，并出现系列机。70 年代中开始推出现代巨型机，应用了最先进的计算机科学技术成就，使机器达到最快的运算速度、最大的存储容量、最强的 I/O 处理能力。2010 年 6 月 1 日，中国首台实测性能超千万亿次的超级计算机——曙光“星云”高性能计算机系统正式发布，超千万亿次的计算能力再次刷新了中国高性能计算的最高速度，在 2010 年 5 月 31 日公布的第 35 届全球超级计算机 TOP500 排行榜中排名第二。微机的推出，因其轻巧、价廉，使计算机能普及到个人应用。在微机发展的基础上，增强图形处理的硬件形成工作站。微机向轻、薄、短、小发展，产生了便携式计算

机及掌上机。各型的计算机在性能上都在不断地提高，过去只能在巨型计算机、大型计算机上采用的系统结构方面的先进技术，如流水线技术、**高速缓冲存储器**技术、虚拟存储器技术、冗余可靠性技术等已不断地下移到小型计算机、微型计算机上，甚至微处理器芯片上。随着 RISC 技术的成熟，芯片功能越来越强，使运算速度急剧提高。

按并行处理结构分类：根据处理机（计算机系统中存储程序和数据，并按照程序规定的步骤执行指令的部件。处理机包括**中央处理器**、**主存储器**、输入-输出接口。处理机加接**外围设备**就构成完整的计算机系统）执行指令的序列——指令流，由指令流所调用的数据序列——数据流，以及处于同一执行阶段的指令和数据的最大可能个数，可分为单指令流单数据流（single instruction single data stream，SISD）、单指令流多数据流（single instruction multiple data stream，SIMD）和多指令流多数据流（multiple instruction multiple data stream，MIMD）计算机。SISD 计算机：指令部件的工作方式是一次只对一条指令译码，并只对一个操作部件分配数据，即传统的顺序执行的标量计算机。即使是内设置多个操作部件（如运算协处理器）的计算机，只要没有改变这种方式的，均属此类。SIMD 计算机：处理机内有多个重复的处理单元，由单一指令部件按照同一指令流的要求，同时向各处理单元分配各自的数据。如阵列处理机、相联处理机等，大都是专用的并行处理计算机。此外，流水线计算机也可划入此类。MIMD 计算机：相互通信的多个处理机协同工作，实现作业、任务、指令、数组级的全面并行处理。这类计算机有按传统冯·诺伊曼结构的共享存储器的多处理机和分布存储器的多处理机以及非冯·诺伊曼结构的由数据驱动的数据流计算机、按需求驱动的规约计算机等。现代巨型机、大型机大多采用 MIMD 多处理机结构。

按使用方式分类：可有多用户计算机、单用户计算机、工业控制计算机、嵌入式计算机、多媒体计算机等。

应用 计算机可以处理的信息包括：数值、文字、符号、声音、图形、图像等。因此计算机的应用范围十分广泛，其所涉及的领域有科学计算、**汉字信息处理**、**计算机图形学**、**数字图像处理**、计算机辅助技术、**多媒体技术**、**计算机过程控制**、**管理信息系统**以及**计算机仿真**等。

科学计算：为解决科学与工程技术领域中的问题，有效使用计算机求数学模型近似解的方法和过程。如天体运行规律的计算、数字图像处理的计算、电力系统的潮流计算等。这类计算的特点是算式复杂，精度要求高，而需要输入的数据并不多，有些计算虽然算式复杂，但通常是多相关元素参与运算，可以分解成若干相对简单的部分，如常用的有限元分析。科学计算是最早的，也是基本的计算机应用之一。

汉字信息处理：研究用计算机处理汉字信息所涉及的原理、方法和技术。包括语言及文字的输入方法、文档表格的编辑与生成、文字和语言的自动识别与合成以及自然语言的理解和机器翻译等，还包括汉字的编码及输入的方法。

计算机图形学：借助计算机产生真实物体或想象物体图形的综合性技术。它研究如何在计算机上建立物体的模型，并通过图形设备将这些模型转化为可视的二维或三维图形。计算机图形学典型的应用领域有：**科学计算可视化**、动画设计、**计算机辅助设计**、**计算机辅助制造**、**计算机过程控制**、**办公自动化**、电子出版以及艺术制作等。

数字图像处理：利用计算机对图像进行去除噪声、增强、复原、分割、提取特征等处理的理论、方法和技术。通过对数字图像的处理，以提高图像的视觉质量，提取图像中所包含的某些特征或特殊信息，为计算机分析图像提供便利，实现图像数据的变换、编码和压缩，以便于图像的存储和传输。广泛应用于遥感遥测、大地测量、资源勘探以及医学等方面。

计算机辅助技术：主要有计算机辅助设计、计算机辅助制造、计算机辅助工程、计算机辅助教学等方面。计算机辅助技术可以使计算机成为有效的辅助工具，形成以人为主导的人机结合系统，通过以图形为主的人机交互方式来实现辅助功能。针对工程数据的管理、交换、规范化以及与其他信息系统联系等方面进行的研究，使计算机辅助技术向系统化、集成化方向发展。

多媒体技术：用计算机交互式综合处理文字、图形、图像、声音和一般数据等多种信息，使多种信息建立起逻辑连接、并集成为系统的技术。它汇集了计算机体系结构、计算机软件以及视频、音频及各种媒体信号的获取、处理、显示和输出等技术。它的出现拓宽了计算机处理信息的类型，方便了用户，推动了计算机的普及与应用，形成了专门的技术，成为现代技术的重要标志。

计算机过程控制：计算机用于实验、生产过程中进行操作控制的过程和技术。它通过检测获取被控对象的数据和变量信息，经计算作出判断，实现控制。计算机控制能有效提高产品质量和产量，降低能耗和材料消耗，改善劳动条件和提高操作安全性。

管理信息系统：由人、计算机和管理规则等组成的人-机系统，用以收集、传递、储存、加工、维护与使用信息。计算机管理信息系统是计算机应用最广泛的一个领域，在电力、金融、运输、制造等部门广泛应用，明显地提高了工作效率和管理效能。

计算机仿真：根据各种类型系统的有关概念、变量、逻辑关系、数学表达式等必要信息，建立数学模型并在计算机上加以体现和试验，其目的是了解系统的特性及其内在的联系，从而达到分析、研究系统的过程与技术。它已成为工程设计，系统开发，自然科学、经济和社会问题研究以及进行教育培训的有力手段，如电厂的仿真培训系统。

展望 包括科学与工程技术两个方面的计算机科学技术学科，研究设计、制造计算机和信息获取、表示、储存、处理、利用等的理论、原则、方法和技术，科学与技术两者地相互作用、高度融合，会使计算机的发展更加迅速。

计算机科学技术的发展方向是：高速、低耗、超大规模集成电路和并行处理技术，使计算机的内存储器容量和运算速度在过去几十年以约每隔18个月翻倍的速度提高；高密度表面组装技术，使计算机结构更为紧凑、微型化；综合声音、图像、动画、文字的多媒体技术与模式识别、自然语言处理，使人机交互更为和谐；光缆通信和计算机网络的发展已改变社会活动模式和人们的生活方式，加速人类社会信息化进程；计算机辅助软件工程、软件设计过程自动化，使软件生产和维护从手工转向工程化；战略性的跨系统应用体系结构使计算机系列兼容；开放系统互连提供计算机通信和互操作环境；计算机根据人工智能的原理，在运行中自动学习、推理、判断，已部分代替人的脑力劳动。智能计算机是计算机界研究的长远目标。

（注：本文由本卷编委会集体完成）

电工技术基础卷

第一版前言

电工程（简称电工）发源于19世纪中叶。19世纪初，意大利物理学家A. 伏打（Alessandro Volta，1745—1827）发明了伏打电堆，即电池，第一次为物理学家提供了产生持续电流的电源，极大地促进了电磁学的发展。电磁现象的应用在电磁学理论的指导下也迅速发展。从1835年发明电报开始到20世纪初，电话、白炽灯、发电机、电动机、交流供电线路、电子管相继发明。工、商业获得了新的动力和通信手段，电力可以远距离输送，通信几乎可瞬间地完成：一个新的电的时代取代了蒸汽时代。1883年，恩格斯对1500～2000V、57km输电线路的建成给予了极高的评价，认为这实际上是一次巨大的电工技术革命。电工程于是诞生了。

电能是应用最普遍的、最大的二次能源。它渗透到各个产业部门和日常生活。经过近百年的发展，由于电工材料工业、电机电器制造工业和电力系统自身技术的不断进步，现在大电力系统的电压高达500～765kV，覆盖面积达1000多km^2，形成一个复杂的大系统。随着自动控制理论、计算机技术的进展，电力系统管理技术正向以计算机网络为标志的综合调度自动化方向发展。

早期的电工一词，既包括电机电器制造、电力的产生和传输等方面（习惯上称强电技术），又包括通信、电子技术等方面（习惯上称弱电技术）。约在第二次世界大战结束以前，中国称电工程为电机工程。二次大战以后，电子技术有着划时代的进步，它的一些标志为：1946年制成第一台电子计算机（计算机现已成为一门学科），1947年制造出晶体管，1959年出现了集成电路。电工一词乃逐渐演变为只包括强电技术，而弱电技术则由电子工程一词概括。这表明上述两门技术都已进步到必须作出新的学科划分来容纳它们日益扩大的技术内涵。当然，二者也是相互渗透的，否则不会原来统一于一个学科之中。例如，直流输电的一次系统和电力系统的二次回路，就广泛应用了电子技术。至于二者的技术基础，更有着许多共同的部分。如前所述，随着电力系统的信息和控制的进步，自动控制理论和计算机技术的一些基本内容，也顺理成章地成为电工学科的基础之一。为了给电力工作者提供必要的电工技术基础知识，把有关的基础知识编纂成《中国电力百科全书》电工技术基础卷。本卷由电工基础、电子技术基础、电磁测量、电工材料、高电压技术基础、自动控制理论和电子计算机七部分组成。至于电机学的有关内容，从《中国电力百科全书》的整体设计考虑，发电机原理在火力发电卷和水力发电卷中介绍，变压器原理在输配电卷中介绍，电动机原理在用电卷中介绍，这样安排对读者检索较方便。因此本卷未含电机原理内容。

电工基础 包括电磁场理论和电路理论两部分。电磁场理论揭示出宏观电磁现象的基本规律，即电磁场的分布、联系和变化的规律。诸如输电线路的参数计算、电机电器的电磁设计、半导体器件中物理过程的阐释、电磁干扰的本源和抑制等，都要用到电磁场理论。电路理论则是以电路模型作为对象，研究其中电磁过程的基本规

律和分析方法。用电路模型反映电工设备和电子器件的电磁本质，是工程上广泛采用的一种研究方法。例如电力系统的潮流计算和稳定性分析、电子电路的分析和设计等，都采用电路模型的分析方法。

电子技术基础 20世纪50年代以前，电子技术的核心器件是电子管。现在，半导体器件已占统治地位。半导体器件加上其他电路元件，可以构成具有各种功能的电子电路，在直流输电、电动机调速、通信、控制、测量、计算机等方面得到极广泛的应用。电子电路分为模拟电子电路和数字电子电路两大类。模拟电子电路中处理的是随时间连续变化的电压、电流等量。整流电路、放大电路等属于模拟电子电路。数字电子电路中的输入输出电压通常是高电平或者是低电平。它们可分别代表二进制数中的数字“1”和“0”和逻辑代数中的“真”和“伪”。利用高、低电平的相互转化，数字电子电路能实现数字运算和逻辑运算功能。逻辑门电路、触发器等属于数字电路。许多数字电子电路和模拟电子电路已制成集成电路。

电磁测量 包括测量仪表和测量方法两部分，测量对象是电学量和磁学量。从19世纪初开始，电磁测量是和电磁学同步发展、相互促进的，因为后者的发展离不开科学实验，特别是定量的实验。电磁效应的广泛应用，更促进电磁测量的发展，并且要求测量仪表的生产实现工业化。19世纪末到20世纪初，常用电表如电流表、电压表、电能表等，较量仪器如电桥、电位差计等，测磁仪器如磁通表、爱波斯坦仪等，都已陆续制成工业产品。到20世纪50年代，经典电磁测量已形成了较完善的科学体系。1952年，第一台数字电压表问世，随后数字电表迅速发展。数字电表具有准确度高、速度快、便于和计算机连接进行智能化测量等突出优点，成为电磁测量的一个重要发展方向。

电工材料 电工材料是指电工设备中使用的承受电磁场的作用、具有一定有效功能、能保证设备正常运行的材料，它是设备制造的物质基础。电工材料按其性质和功能可分为绝缘材料、导电材料、半导体材料和磁性材料。电工材料范围广泛，不同部类属于不同学科而各有其自己的理论基础，制造工艺也迥然不同。电工设备性能取决于材料的性质和设备结构上的完善性。近年来，随着材料科学及其工业的发展，电工材料不断出现性能更为优异的新品种，例如绝缘材料中的六氟化硫、半导体材料中的砷化镓等。电工材料的更新必将导致设备的改革，并产生巨大的经济效益。

高电压技术基础 随着电力系统容量的不断扩大，输电距离的不断增加，电力系统的输电电压也越来越高。由于电力系统外部或内部的原因，还可能短时地出现高出正常运行电压的各种过电压。在极高电压下，电力设备的绝缘将发生破坏而失去绝缘作用。高电压技术就是为了解决这一对矛盾而发展起来的电工技术。高电压、大电流下实验技术十分复杂，从而也成为高电压技术中的一个重要组成部分。高电压技术研究的主要内容有：电介质的电气物理性能，特别是击穿过程及其机理；解决电力设备绝缘问题的措施；电力系统过电压的限制和防护；高电压及大电流试验技术；电磁兼容等。高电压技术，作为研究高电压及大电流下物质中的物理现象及其应用的科学，现在除在电力工业中起重要作用外，在脉冲高功率技术、某些技术物理部门、冶金工业、环保工程等不同领域都有着广泛的应用。

自动控制理论　关于自动控制系统的构成、分析和设计的理论。自动控制系统，是在代替或部分代替人的直接参与下，使生产过程或其他过程按期望规律或预定过程进行的控制系统。自动控制理论有经典控制理论、现代控制理论和大系统理论。经典控制理论是采用传递函数和频率特性描述，研究单输入单输出控制系统的控制理论。1868年发表了第一篇研究论文，20世纪40～50年代趋于成熟。现代控制理论是建立在状态空间法基础上的，可处理多变量、非线性、时变、非确定性等系统问题，20世纪60年代形成。大系统理论是关于大系统的构成、分析和设计的理论（大系统是规模庞大、结构复杂、目标多样、影响因素众多，且常带有随机性的系统），20世纪60年代开始提出，80年代形成。

电子计算机　即电子数字计算机，它是人类文明的一大成就。第一台电子数字计算机ENIAC于1946年建成，用了约18000个电子管，现在无例外地采用了大规模和超大规模集成电路。它是按程序自动处理信息的机器系统，广泛应用于科学计算、生产过程自动控制、数据处理、信息管理、图形图像处理、人工智能等方面，对各行各业甚至人的日常生活有着越来越大的影响。计算机由硬件系统和软件系统组成。硬件系统有中央处理、存储器、输入输出设备等，它是计算机赖以工作的物质基础。软件系统由程序及其文件组成。软件和硬件一起工作，使计算机完成给定的任务。

电工技术基础卷（第一版）编审委员会

1994年4月

电工技术基础卷

第二版前言

《中国电力百科全书·电工技术基础卷》第一版于1995年出版，旨在为电力工作者提供必要的电工技术基础知识。本卷第一版出版发行以来受到读者好评，起到了积极作用。

20世纪90年代以来，世界和中国电力工业继续向前迈进，并促使相关领域的学科理论和应用技术进一步发展。作为本卷组成部分的电工基础、电子技术基础、电磁测量、电工材料、高电压技术基础、自动控制理论和计算机七个分支，在各自的领域范围内，也有不少新的理论和技术内容出现，它们之中的成熟内容应该介绍给读者。为此，按照“删繁就简，增补更新，精益求精”的原则，对第一版进行修订，力求体现先进性、实用性和前瞻性。例如，在电工基础分支中，新增了适合于工程实用的“电磁场数值计算”，增加了一种新的信号处理方法“小波变换”，将它与“傅里叶变换”“拉普拉斯变换”一起介绍给读者，对“混沌”也作了介绍。在电子技术基础分支中，新增了近年发展迅速并已成熟的“可编程逻辑器件”和“开关型稳压电路”两类条目，以及对电力电子器件作了补充。在电磁测量分支中，新增了作为发展方向的“虚拟仪器”，适应电力系统电压等级升高的“光电式互感器”，以及“数字测量系统”“自动抄表技术”。在电工材料分支中，对某些涉及试验方法的条目，进行了内容更新、补充，介绍了某些材料新开发出来的用途，如SiC在高温下的应用。在高电压技术基础分支中，新增了“高电压的光电测量”、“高电压测试的抗干扰措施”；为反映20世纪80年代以来发展迅速的电力设备诊断技术，除对原有的“绝缘诊断技术”进行内容补充外，还新增加了“变压器绝缘在线诊断”“电机绝缘在线诊断”和“电容型绝缘在线诊断”。由于被控对象日益复杂，往往难以建立数学模型，为了解决控制问题，一类新型的控制技术逐步发展起来。因此，在自动控制理论分支中，新增了“鲁棒控制”“H_∞控制”“模糊控制”“智能控制”和“神经网络控制”等条目。计算机技术的发展更为迅速，在计算机分支中，新增了可视化“C++语言”网络编程“Java语言”“第四代语言”“面向对象的程序设计方法”“数据仓库”“多媒体技术”“虚拟现实技术”“因特网”“宽带综合业务数字网”“信息高速公路”和“智能计算机”等条目。

本卷第二版的编审工作得到了清华大学、浙江大学、西安交通大学、华北电力大学、中国电力科学研究院和北京供电局等单位的大力支持，谨表示衷心感谢。

书中疏漏和错误在所难免，恳请读者批评指正，以期再版时订正。

电工技术基础卷（第二版）编审委员会

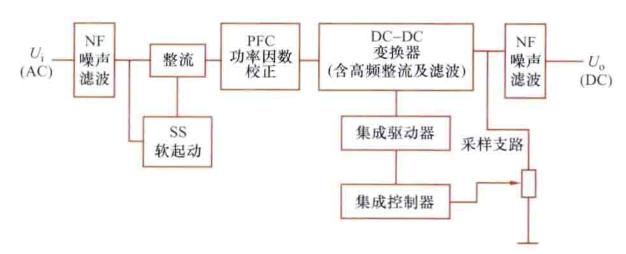
2000年8月

目　录



AC-DC xing kaiguan wenya dianlu

AC-DC 型开关稳压电路 （AC-DC type switching voltage stabilizing circuits） 将交流电压通过整流滤波电路及 DC-DC 开关变换器，并借助反馈环节得到稳定直流输出电压的开关型稳压电路。其原理框图如图所示。图中输入和输出端都加有噪声滤波器。电容滤波全波整流电路中，开机时有一大的充电电流流过整流管。为了削弱该冲击电流，在 AC-DC 型稳压电路中加入软起动电路。电容滤波整流电路中电流失真很大，使功率因数很低。为了提高功率因数，通常采用功率因数校正技术。20 世纪 90 年代以前，采用无源校正技术，只能对基波进行相移补偿或抑制某些指定的谐波。实际应用中，还受到体积、质量、价格等因素的限制。20 世纪 90 年代后普遍采用高频有源功率因数校正技术。图中的有源功率因数校正电路实质上是一种升压式有源功率因数校正（boost-PFC）电路（见 DC-DC 型开关稳压电路）。



AC-DC 型开关稳压电路原理方框图

它可将稳压电路的输入电流波形变换为与输入电网电压同相位的正弦波，变换效率可大于 98%。这样，可以降低线路损耗，节约能源，减小电网的谐波污染。

对小功率的 AC-DC 型稳压电路，可省去图中的集成驱动器，由集成控制器直接驱动。AC-DC 型稳压电路组成的开关电源及模块，广泛应用于通信和其他电子设备中作为一次电源用。

ASCII ma

ASCII 码 （ASCII code） 见代码。

Anpei

安培 （ampere） 国际单位制（SI）中电流的单位。安培简称安，符号是 A。它是国际单位制的基本单位之一（见电学和磁学量单位制），也是磁动势的单位。在真空中，截面积可忽略的两根相距 1m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7}N，则每根导线中的电流定义为 1A。图示为安培的画像，电流的单位是以他的名字命名的。



安培（Andre Marie Ampere，1775—1836）

Anpei huanlu dinglü

安培环路定律 （Ampère's circuital law） 见磁场强度、磁路。

anza

安匝 （ampere-turns） 磁动势的单位。在磁路计算的一些场合，磁动势用线圈的匝数与线圈中电流的安培数的乘积来表示。国际单位制（SI）中电流的单位是安培，因此电气工程中以安匝作为磁动势的单位。



50% chongji jichuan dianya

50%冲击击穿电压 （50% impulse breakdown voltage） 绝缘间隙在多次施加冲击电压时，其中半数导致击穿的电压。用于衡量绝缘间隙的绝缘强度。

要使绝缘间隙击穿，需要加足够高的电压以及足够长的电压作用时间。绝缘间隙击穿的放电时间包括电压上升达到稳态击穿电压所需的时间和放电时延。放电时延又由两部分构成：统计时延和放电形成时延。统计时延指达到稳态击穿电压后到间隙中出现有效（对击穿）的自由电子为止的时延；放电形成时延指从出现有效的自由电子直到击穿通道完全形成为止的时间。放电时延有分散性。放电时间随所加电压的增高而缩短。

在作用时间短促的冲击电压下，由于放电时延有分散性，当所加电压峰值固定，但还不够高时，击穿有时发生，有时不发生。施加多次电压时，击穿概率可表现为一定的百分比。由于难以准确地得到刚好发生击穿的临界电压，所以采用50%冲击击穿电压来反映间隙耐受冲击电压的特性。在实验中决定50%冲击击穿电压时，施加电压的次数越多越准确。在用测量球隙测量冲击电压时，所采用的实用而简单的方法是，调整电压至施加10次电压中有4～6次击穿，这个电压值就可近似作为某一间隙下的50%冲击击穿电压。中国国家标准GB/T 16927.1—2011《高电压试验技术　第一部分：一般定义及试验要求》中规定，可以使用多级法或升降法确定50%冲击击穿电压。对多级法，电压级数≥4，每级电压下的冲击次数≥10。对升降法，电压级差约为U_{50}估算值的1.5%～3%，每级电压下的冲击次数为1，有效冲击次数$n \geq 20$。采用50%冲击击穿电压决定绝缘距离时，应根据分散性的大小，留有一定的裕度。

BASIC yuyan

BASIC语言 （BASIC） 见程序设计语言。

BCD ma

BCD码 （BCD code） 见代码。

Bashen dinglü

巴申定律 （Paschen law） 表征均匀电场气体间隙的击穿电压与间隙距离、气压之间的关系。该定律说明在均匀电场下，气体间隙的击穿电压U_b只与间隙气压p和距离d的乘积pd有关，即

$$U_b = f(pd) \tag{1}$$

式（1）表示的曲线称为巴申曲线。

1880年W. 德拉路（W. de la Rue）和H. W. 米勒（H. W. Muller）首先通过实验研究了空气气压对放电的影响，得到了现在所称的巴申曲线。1889年F. 巴申（F. Paschen）在平行板电极间进行实验，完善了这种曲线。在1903年汤森放电理论建立以后，可从汤森放电理论的自持放电条件（见汤森放电理论）推出巴申定律的表达式。反过来由实验得出的巴申定律也支持了汤森放电理论。

从自持放电条件可以得出均匀电场中气体间隙击穿电压的表达式为

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln\left[\frac{Apd}{\ln(1+1/\gamma)}\right]} \tag{2}$$

式中A和B是电子碰撞电离系数α表达式中的常数；γ是阴极二次电子发射系数（见汤森放电理论）。在式（2）中假定γ是不依赖于电场强度E和气压p的常数。由式（2）即可画出巴申曲线。气体Ar、H_2、Hg、Ne的巴申曲线如图所示。

气体Ar、H_2、Hg、Ne的巴申曲线

巴申曲线最低点处对应的电压$U_{b\cdot min}$和相应的$(pd)_{min}$值均可由式（2）导出。在实用中，$U_{b\cdot min}$和$(pd)_{min}$采用实验所得的数值。

影响间隙的击穿电压U_b的因素，除pd值是主要的外，还有气体的种类和成分、阴极材料的成分和表面状况、电极形状以及外界电离因素等。

bangong zidonghua

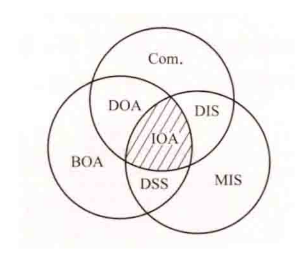
办公自动化 （office automation，OA） 利用先进的科学技术、办公设备和计算机系统，为提高办公效率而构成的服务于办公业务的人机信息系统。它综合运用计算机技术和通信技术，将数据、文字、图形、图像和语音等功能组合在一个系统中，完成各项办公业务，其目的是改善办公环境，提高办公效率和质量。

OA系统包括信息采集、处理、传输、存储和管理五大部分，核心任务是向各层次的办公人员、决策人员提供所需的信息。

一个典型的办公自动化系统如图所示，BOA（basic office automation）、Com.（communication）和MIS（management information system）相交的阴影部分称为综合办公自动化系统（integrated office automation，IOA）。BOA即基本办公自动化系统，用于处理事务类型的各种办公业务，包括文字处理、文件收发、登录、行文处理、报表处理、文档管理、办公日程管理、电子函件和行政事务管理等；Com.表示通信系统；MIS表示管理信息系统。它们两两组合构成分布式办公自动化系统（distributed office automation，DOA）、分布式信息系统（distributed information system，

DIS）和决策支持系统（decision support system，DSS）。DSS根据MIS中的数据和日常办公事务的要求而进行辅助决策。

办公自动化20世纪50年代中在美国首先出现，指利用电子数据处理设备使簿记工作自动化，此后经历了三个阶段。第一阶段采用文字处理机、复印机、传真机、专用交换机等办公自动化设备实现单项业务的自动化。第二阶段把分散在各办公室的电子计算机系统连接成计算机局部网络，常采用电子报表、电子文档、电子邮件等新技术和高功能的办公自动化设备。第三阶段办公自动化向建立综合业务数字网的方向发展，出现高功能的OA软件包、多功能的OA工作站和各种联机办公自动化设备。在现代技术、设备支持下，OA及其系统呈小型化、集成化、网络化、智能化及多媒体化五大趋势。



典型的办公自动化系统

bandaoti

半导体

（semiconductor）　导电能力介于金属导体和绝缘体之间的固体材料。通常规定在室温下，电阻率的数量级为10^{-6}～$10^{8}\Omega\cdot m$，而且电阻率值强烈地受到材料的结构和掺杂状况以及周围环境（温度、电场、磁场、光照、压强、核辐射等）影响的固体材料为半导体。从能带结构看，半导体与绝缘体相似，所有的价电子数正好填满价带，但其价带与导带间的禁带，较绝缘体的要窄得多，一般在2～3eV以下。

半导体的电阻率随温度的上升而迅速减小，具有负温度系数。这与金属的情况相反。

半导体的电阻率强烈地受杂质影响。例如高纯锗，室温下电阻率为$0.43\Omega\cdot m$，若每2×10^{6}个锗原子中掺入一个杂质原子锑，则在室温下电阻率降为$9\times10^{-4}\Omega\cdot m$，减小约470倍。又如在硅晶体中，每$10^{5}$个硅原子中掺入一个杂质原子硼，则比纯硅在室温下的电导率增加10^{3}倍。

半导体中载流子有两种：电子和空穴。电子带负电荷，电量为1.6×10^{-19}C，空穴带正电荷，电量与电子所带的大小一样。而在金属中，只有电子一种载流子。

半导体具有比金属大得多的温差电效应，半导体还具有光电效应、霍耳效应、磁阻效应、热磁效应、光磁电效应、压阻效应等物理效应。

半导体与金属接触、不同导电类型的同一种半导体材料间接触（称为PN结）、导电类型相同或相反的异种半导体材料间接触（称为异质结），均能显示出非对称的导电特性（称为整流特性）及非线性的电流电压关系（非欧姆性的导电特性）。

半导体具有的各种物理效应以及整流特性等现象，是制作各种半导体器件、集成电路所依赖的基础。

不含杂质和缺陷的纯净半导体，其内部电子和空穴浓度相等，称为本征半导体。它们制成的器件性能很不稳定，因此不宜用于制作半导体器件。掺入一定量杂质的半导体称为杂质半导体或非本征半导体，这是实际用于制作半导体器件及集成电路的材料。

如果掺入的杂质能够施放电子而产生导电电子以及形成正电中心，这种杂质称为施主杂质或N型杂质，含施主杂质的半导体称为电子型或N型半导体，它主要靠电子导电。若掺入的杂质能够接受电子而产生导电空穴以及形成负电中心，这种杂质称为受主杂质或P型杂质。含受主杂质的半导体称空穴型或P型半导体，它主要靠空穴导电。

若半导体中导电电子和空穴服从玻尔兹曼统计分布，其费米能级处于禁带中，则称为非简并半导体。若导电电子和空穴服从费米统计分布，其费米能级接近或进入导带或价带中的半导体称为简并半导体。

已发现属于半导体的材料约有一千多种，可以分为：①元素半导体：如硅、锗、硒、碲等。②化合物半导体：这类半导体很多，有由两种元素组成的二元化合物半导体，以及由三种元素或更多种元素组成的多元化合物半导体。在二元化合物中，又有Ⅲ－Ⅴ族、Ⅱ－Ⅵ族、Ⅳ－Ⅳ族等。二元化合物有LiF、CdS、ZnO、GaAs、PbS、GaP等；三元化合物有$Ga_{x}In_{1-x}As$、$CuGaSe_{2}$、$AgGaTe_{2}$、$AgSbTe_{2}$等；四元化合物有$Ga_{x}In_{1-x}As_{1-y}P_{y}$等。③非晶半导体：如a－Si、a－Ge、a－SiC等。④有机半导体：如萘、蒽、酞菁等。应用最多的是元素半导体硅、锗和Ⅲ－Ⅴ族化合物砷化镓等。

在工业生产和科学研究中使用的半导体材料，绝大部分是单晶材料，但也有少数应用和研究中使用多晶或非晶态半导体材料，如多晶硅薄膜、非晶硅等。

bandaoti cunchuqi

半导体存储器

（semiconductor memory）　用半导体大规模集成存储器芯片作为存储媒体的，能对数据信息进行存取的存储器件。多用作计算机可寻址存储器。20世纪70年代以来，它逐步取代磁芯存储器而在计算机的高速存储方面得到广泛应用。根据功能特性，半导体存储器可分为随机存取存储器（RAM）和只读存储器（ROM）。

随机存取存储器　按地址以相同速度随机地读出/写入数据的存储器。按制造工艺分为双极型和MOS型两类：①双极型存储器。它以双极型触发器作为存储单元。其中晶体管-晶体管逻辑存储单元称为TTL型存储器，采用射极耦合逻辑存储单元的称为ECL型存储器。双极型存储器工作速度快，但功耗大，集成度低，主要用作高速缓冲存储器和要求工作速度高的存储器。②MOS型存储器。它以MOS场效应晶体管作为单元电路，按工作方式又分为静态随机存取存储器和动态随机存取存储器两类。静态随机存取存储器（SRAM）的单元电路是触发器，用两个稳定状态表示一个二进位。动态随机存取存储器（DRAM），由一个MOS电容和一个MOS晶体管构成。数据以电荷形式存放于电容上。由于有泄漏电流，需周期性刷新，但功耗低，集成度高，主要用作大容量主存储器。

半导体随机存取存储器有易失性。如果电源切断，则所存信息消失。若要保护信息，则存储系统须具有在掉电前自动转换到后备电源的功能，或将所存信息转移到非易失性的媒体保存。

只读存储器　用来存储固定程序或数据，只能读出不可写入或改写的存储器。以字线和位线的交叉点是否有耦合器件来决定该单元存储“0”或“1”数据。它分成四类：

(1) 掩模编程只读存储器（mask ROM）。用掩模有选择地在字线和位线交叉点上生成耦合器件实现固化。通常由生产厂编程固化。

(2) 可编程只读存储器（PROM）。由用户编程固化，并只能写入一次的芯片。产品出厂时是未经编程的，所存内容是全“0”或全“1”。用户可根据使用要求，用电气的方法将串联于相应存储单元的熔丝熔断开路或将相应的连接用PN结二极管熔合短路，以区别存储内容为“1”或“0”。

(3) 可擦可编程只读存储器（EPROM）。可用紫外线擦去原存信息，再次编程写入的芯片。用浮栅雪崩注入MOS器件时，在选定器件的漏极或源极上加高压引起雪崩注入，在浮动栅积存电子，改变单元电特性，表示存入信息。通过紫外线照射，消除积存电子，可再次编程写入。

(4) 电擦除可编程只读存储器（EEPROM）。可通过计算机用电擦除，进行在线修改的芯片。可在强电场作用下，通过隧道效应将电子注入浮栅或反过来将电子从浮栅消除。由微处理器及EEPROM装在基体内制成的塑料卡，在金融、电信、流通等部门获得广泛的应用。

bandaoti erjiguan

半导体二极管 （semiconductor diode） 具有两个电极和不对称电流-电压特性的半导体器件。它的主要特点是具有单向导电性。所用的材料有硅、锗和化合物半导体。利用不同的材料、掺杂浓度、几何结构，可以制成不同用途、特性各异的半导体二极管，如半导体整流二极管、硅稳压二极管、半导体开关二极管、隧道二极管、变容二极管、肖特基二极管等。

分类 按结构不同可分为点接触型和面接触型两类。①点接触型半导体二极管由一根金属丝与半导体表面相接触形成的势垒而构成PN结，外加引线、管壳封装而成，如图1（a）所示。因其PN结面积小，结电容小，故适用于高频电路中，工作频率可达几百兆赫，但不能通过较大的电流，因而多用于高频的检波电路、混频电路中。肖特基二极管也是点接触型二极管，它的开启电压低，电荷存储效应小，能工作在更高的频率。②面接触型半导体二极管，如图1（b）所示，由于PN结的面积大，结电容大，故可通过较大的电流，适用于低频的整流电路中。二极管的图形符号如图1（c）所示。

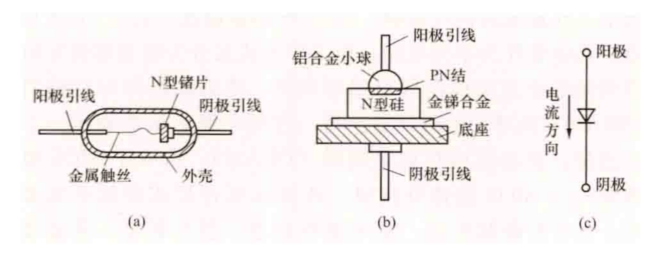


图1 半导体二极管的结构及符号
（a）点接触型；（b）面接触型；（c）图形符号

工作原理 半导体二极管的核心是PN结。利用掺杂工艺使同一半导体（如本征硅半导体）的一侧形成P型半导体，在另一侧形成N型半导体。P型半导体内空穴很多（称多子），电子很少（称少子）；N型半导体内电子很多（称多子），空穴很少（称少子）。这样，在P型和N型半导体的交界处的区域内将形成PN结。P型侧的引线为二极管的阳极，N型侧的引线为二极管的阴极。

PN结的形成如图2（a）所示，在P型半导体和N型半导体的交界处，P型一侧的空穴浓度高，N型一侧的空穴浓度低。这种浓度差，导致空穴从P型侧向N型侧扩散，于是，P型侧在交界处便失去空穴，留下带负电荷的负离子，如图2（a）中的“㊀”所示。由于浓度差造成的载流子移动称为扩散运动。同理，电子从N区向P区扩散，在交界处N型一侧留下正离子“⊕”。这些正、负离子由于原子内部结构关系，是不能任意移动的，它们不参加导电，不是载流子，因此，在交界处便形成了积聚很多正、负离子的区域，在此区域内，只有固定不能移动的正、负电荷，而没有载流子，这个区域称为空间电荷区。在空间电荷区内，多数载流子已经完全扩散到对方并被对方复合掉了，故又称为耗尽层，这就是PN结。因PN结内没有载流子，故具有很高的结电阻r。在空间电荷区内，由于离子分别带正、负电荷，故形成一个电场，它的方向自N区指向P区。因这个电场是在无外加电压时，由载流子浓度差造成的，故又称为内电场。由图2（a）可见，这个内电场的方向是要阻止多子向对方继续扩散的，但是，内电场却有利于两边的少子向对方漂移；少子在电场作用下向对方的移动称为漂移运动。当载流子的扩散和漂移相等时，达到动态平衡状态，此时，N区的电位高于P区V_0，V_0一般为零点几伏，如图2（b）所示。N区的电子必须具有越过图2（c）所示的势垒能量才能到达P区，势垒的高度等于qV_0电子伏，式中q为电子的电荷。以上是在PN结两端没有外加电压时的情况。

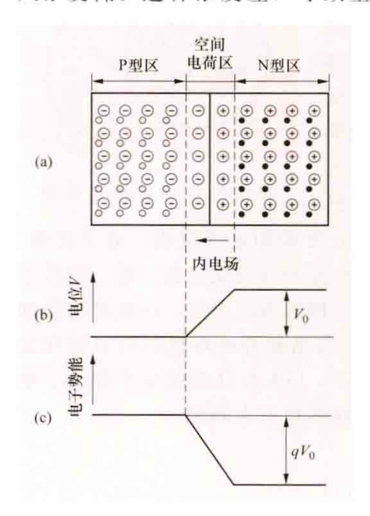


图2 PN结的形成
（a）空间电荷区；（b）PN结的电位分布；（c）电子势能

当PN结两端外加正向电压U_F时，即P区接正，N区接负时，P区的电位被外加电压升高了U_F，而N区的电位只高于P区电位V_0-U_F，即势垒高度下降到$q(V_0-U_F)$电子伏，于是有更多的空穴从P区向耗尽层移动，和耗尽层内的负离子中和，使耗尽层内的负电荷减少。同理，有更多的电子从N区向耗尽层运动，中和了耗尽层内的正离子。这样，耗尽层内的空间电荷减少，空间电荷区变窄，势垒高度变低，多子的扩散电流大大增加，P区从电源U的正端取得空穴，以补充失去的空穴，于是，外电路中形成一个流入P区的正向电流i_F；同时，N区从电源U的负端取得电子，以补充失去的电子。因势垒降低，结电阻r变得很小，PN结两端的电压降只有零点几伏，i_F之值主要取决于外电路中的电阻，因此外电路中必须串接限流电阻R，如图3所示。

当PN结两端外加反向电压时，将导致耗尽层变宽，势垒高度增加，结电阻大大增加，多子更难于扩散到对

方。势垒的增高虽有利于少子向对方漂移，但由于少子的数量本来就很少（少子的数量主要取决于PN结的温度），因而漂移电流增加极少，外电路中只有很小的反向饱和电流 I_S。

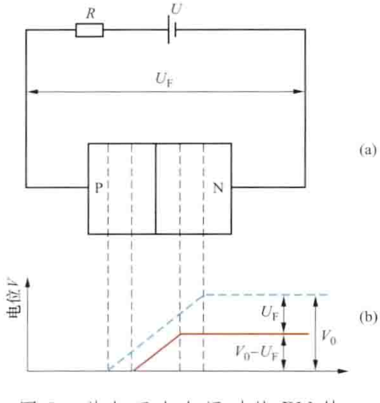


图3 外加正向电压时的PN结
(a) 电路图；(b) 电位分布

特性参数 半导体二极管有伏安特性、PN结电容、工作频率等特性参数。

(1) 伏安特性：半导体二极管的伏安特性可用下式表示

$$i_F = I_S(e^{\frac{u_D}{\eta U_T}} - 1)$$

式中 i_F 为正向电流，mA 或 A；I_S 为反向饱和电流，μA；u_D 为二极管两端的电压降，V；U_T 为温度的电压当量，其值为 $U_T = \frac{T}{11\,600}$ V，当室温（T = 293K）时，$U_T = 25 \times 10^{-3}$ V。伏安特性曲线如图4所示。由图可见：当 u_D 大于某一电压 U_{th} 时，开始有电流通过二极管，U_{th} 称为开启电压或门坎电压；当反向电压超过某一极限值时，PN结被击穿，反向击穿时的电压用 $U_{(BR)}$ 表示，$U_{(BR)}$ 称为反向击穿电压。有的二极管反向击穿后，在相当大的电流范围内，具有恒压特性；硅稳压二极管就是利用这个特性的特殊二极管。图4所示的伏安特性随温度变化而略有变化，当通过PN结的电流恒定时，有 $\frac{du_D}{dT} = -2.2$mV/℃。图中 i_R 为反向电流。

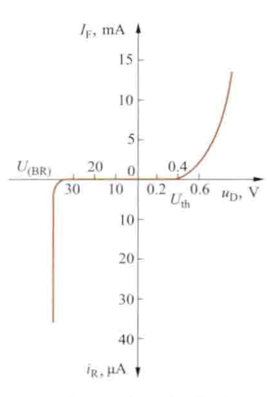


图4 硅二极管的伏安特性

(2) PN结电容：由势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 两部分组成。当二极管的外加电压变化时，耗尽层要变窄或变宽，耗尽层内的电荷将减少或增加，从外电路看，相当于从外部向耗尽层充放电，耗尽层就等效为一个电容，称为势垒电容 C_B。扩散电容 C_D 反映载流子在扩散过程中的积累效应。当二极管外加正向电压时，P区的空穴将扩散到N区，为了在N区内形成扩散电流，N区内的少子-空穴分布必须有浓度差，如图5所示。同理，在P区内也有少子-电子的浓度差；当外

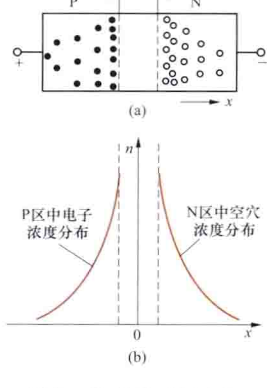


图5 P区和N区中积累的少子分布
(a) 示意图；(b) 浓度分布曲线

加正向电压升高或降低时，少子的积累会相应地增加或减小，从外电路看，相当于有电流的充放，这就体现了扩散电容 C_D 的效应。当二极管两端外加反向电压时，P区和N区内的少子很少，等效的扩散电容也很小，可忽略不计。由此可见：当二极管正偏时，结电容主要是扩散电容；反偏时，结电容主要是势垒电容。结电容是决定二极管高频性能的主要因素。变容二极管就是利用PN结反向偏置时的势垒电容变化的特殊二极管。

(3) 工作频率：二极管适用的电路频率。高频电路中使用的二极管，要求工作频率要高。

此外，二极管的正向电流 I_F 和反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 也是二极管的重要参数。

半导体二极管正朝着高频率、高转换速率（从饱和到截止或反之）、高反向耐压、大电流等方向发展。

bandaoti kaiguan erjiguan

半导体开关二极管 (semiconductor switching diode)

在电路中工作在开关状态的半导体二极管。由于它用于开关电路，要求它的开关速度快。二极管的开关速度取决于结电容上存储电荷的建立或消失的速度。低频整流管因PN结面积大，结电容大，故存储电荷多，由正向导通到反向截止的反向恢复时间较长。开关二极管的结面积较小，同时在制造工艺过程中，利用掺金作用，可以缩短反向恢复时间。掺金作用就是在半导体中掺入极少量的金元素，这些金元素很容易捕获电子，同时与空穴复合而消失，从而加快管子的开关速度。开关二极管由反向截止转化为正向导通所需的时间很短，可以忽略不计。例如硅开关二极管2CK70的反向恢复时间≤3ns，锗开关二极管2AK7的反向恢复时间≤150ns。

bandaoti sanjiguan

半导体三极管 (semiconductor triode; transistor)

能起放大作用，且具有三个电极的双极型半导体器件。自1948年问世以来，它的放大作用和开关作用促使电子技术飞跃发展。由于双极型晶体管工作时涉及两种载流子（空穴和电子）的运动，故称双极型晶体管，常简称为晶体管。它的种类很多，按工作频率的不同，可分为高频管和低频管；按功率的不同，可分为小、中、大功率管；按半导体材料不同，可分为硅管、锗管等。晶体管有三个电极，其常见的外形图如图1所示。

基本结构 常用的晶体管是利用光刻、扩散等工艺制成的平面管。其结构见图2。图2(a)所示为NPN型，图2(d)所示为PNP型。它们都由三个掺杂区和两个PN结构成。图2(b)和图2(e)中，位于中间的那层很薄的半导体称为基区，厚度约1μm至几十微米，基区一侧的半导体层称为发射区，另一侧的称为集电区，各区分别引出基极b、发射极e和集电极c。发射区和基区之间的PN结，称为发射结Je，集电区和基区之间的PN结，称为集电结Jc。晶体管的图形符号如图2(c)

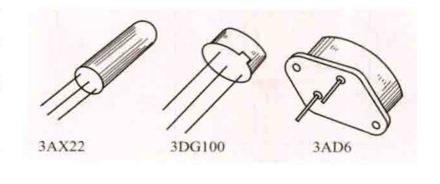


图1 几种晶体管的外形

和（f）所示。箭头表示发射结正向导电时的电流方向。

电流分配和放大原理　晶体管在工作时，它的两个 PN 结上的偏置电压可有三种不同的组合：发射结和集电结均反偏，管子处于截止状态；发射结正偏，集电结反偏，管子处于放大状态；发射结和集电结均正偏，管子处于饱和状态。在模拟电子电路中，主要是利用它的放大状态；在数字电路中，主要利用它的截止和饱和状态。

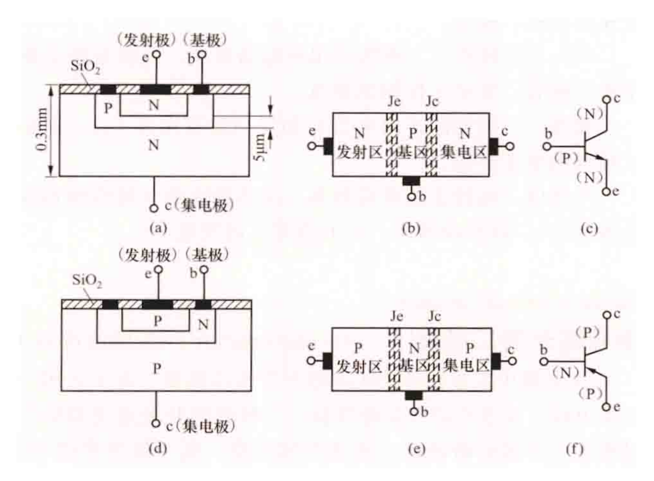


图 2　晶体管结构示意图及其图形符号

（a）、（b）NPN 型平面晶体管；（c）NPN 型图形符号；

（d）、（e）PNP 型平面晶体管；（f）PNP 型图形符号

NPN 型晶体管电路如图 3 所示。发射结处于正向偏置，发射区的电子扩散进入基区，电源不断向发射极补充电子，形成发射极电流 I_E。基区的空穴也要向发射区扩散，但由于基区的空穴浓度比发射区的电子浓度小得多，因此空穴电流很小，可以忽略不计（图 3 中未画出）。由发射区注入基区的电子，由于浓度差别向集电结继续扩散。在扩散过程中，有少量电子与基区中的空穴相遇而复合。电源不断从基区拉走电子，使基区激发出新的空穴，以补偿被复合掉的空穴。被拉走的电子形成电流 I_{BN}（见图 3），它基本上等于基极电流 I_B。由于集电结是反向偏置，所以基区中扩散到集电结边缘的电子在电场的作用下很容易漂移过集电结，到达集电区，形成电流 I_{CN}，它基本上等于集电极电流 I_C。

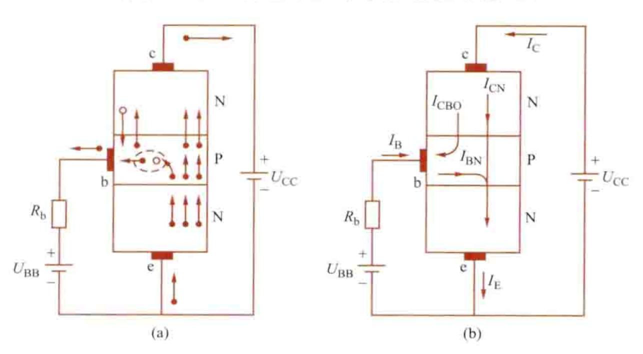


图 3　NPN 型晶体管中的电流

（a）载流子运动；（b）电流分配

此外，集电区少子（空穴）和基区少子（电子）在集电结反向偏置作用下，形成反向饱和电流 I_{CBO}。该电流数值很小，它构成集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 的一小部分（见图 3），但受温度影响很大，与外加电压的大小关系不大。

由上可知，构成发射极电流 $I_E=I_B+I_C$ 中，I_{BN} 与 I_{CN} 相比，I_{CN} 占百分比很大，这个比值用 $\bar{\beta}$ 表示，即

$$\bar{\beta}=\frac{I_{CN}}{I_{BN}}=\frac{I_C-I_{CBO}}{I_B+I_{CBO}}\approx\frac{I_C}{I_B}$$

$\bar{\beta}$ 表示晶体管的电流放大能力，称为共射极直流电流放大系数。所以放大作用是由输入端一个小的变化量（这里是基极电流 I_B）去控制电源 U_{CC} 通过的电流，使输出端产生一个与输入量变化相对应的大的变化量（这里是集电极电流 I_C）。

晶体管的特性曲线　主要有输入特性曲线和输出特性曲线。

（1）输入特性曲线：以 u_{CE} 为参变量，i_B 和 u_{BE} 之间的关系，即 $i_B=f(u_{BE})\Big|_{u_{CE}=常数}$。通常只画出 $u_{CE}\geqslant 1V$ 的一条输入特性曲线，因为 $u_{CE}>1V$ 的其他输入特性曲线基本上是重合的。图 4 是硅 NPN 管（3DG100）的输入特性曲线。输入特性有一段死区。只有在发射结外加电压大于死区电压时，才会有电流 i_B。硅管的死区电压约为 0.5V，锗管的死区电压不超过 0.2V。

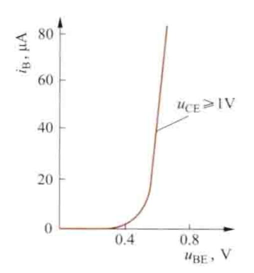


图 4　3DG100 晶体管的输入特性曲线

（2）输出特性曲线：以 i_B 为参变量，i_C 和 u_{CE} 之间的关系，即 $i_C=f(u_{CE})\Big|_{i_B=常数}$。在不同的 i_B 下，可得出一组特性曲线，如图 5 所示。当 i_B 有一微小的增大时，相应的 i_C 有较大增加，曲线上移，这就是晶体管的电流放大作用。通常把晶体管的输出特性曲线分为三个工作区（见图 5）：① 放大区 $i_C=\beta i_B$，也称线性区。② 截止区 $i_B\leqslant 0$，$i_C\leqslant I_{CEO}$。③ 当 $u_{CE}<u_{BE}$ 时为饱和区，在该区中 i_B 的变化对 i_C 的影响较小，两者不成比例。饱和时 c、e 间电压称为饱和压降，记作 u_{CES}，其值较小。

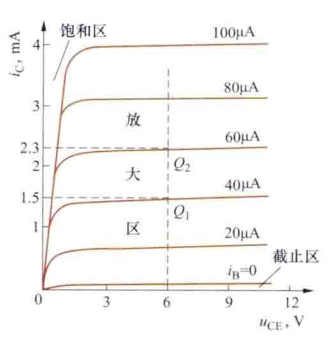


图 5　3DG100 晶体管的输出特性曲线

主要参数　主要有电流放大系数、极间反向电流、频率特性、结电阻和结电容以及极限参数等。

（1）电流放大系数：共射极直流放大系数 $\bar{\beta}(h_{FE})\approx I_C/I_B$；共射极交流电流放大系数 $\beta(h_{fe})=\Delta I_C/\Delta I_B$。共基极直流放大系数 $\bar{\alpha}\approx I_C/I_E$；共基极交流放大系数 $\alpha=\Delta I_C/\Delta I_E$。$\bar{\beta}\approx\beta$，$\bar{\alpha}\approx\alpha$，常用的晶体管 β 值在 20～100 之间。

（2）极间反向电流：I_{CBO} 是发射极开路时，集基极间的反向饱和电流。I_{CEO} 是基极开路时，集发极间的穿透电流。选用管子时，一般要求极间反向饱和电流尽量小，以减小温度的影响。硅管的反向饱和电流比锗管小 2～3 个数量级，故常选用硅管。

（3）频率特性：①特征频率 f_T 是当 β 下降到 1 时的频率。②共发射极截止频率 f_β 是当 β 下降到低频时 $1/\sqrt{2}$ 倍的频率。③共基极截止频率 f_α 是当 α 下降到低频时 $1/\sqrt{2}$ 倍的频

率。f_α>3MHz的晶体管为高频管，f_α<3MHz的为低频管。

(4) 结电阻和结电容：①发射结参数$r_{b'e}$和$C_{b'e}$，分别表示发射结的结电阻［$r_{b'e}=(1+\beta)U_T/I_E$，U_T见半导体二极管］和结电容。②集电结参数$r_{b'c}$和$C_{b'c}$，分别表示集电结的结电阻和结电容。③基区电阻$r_{bb'}$是表示基区的等效体电阻，是高频等效电路的一个重要参数，不同类型的三极管数值相差很大。

(5) 极限参数：①集电极最大功耗P_{CM}由管子的温升决定，硅管结温最高为150℃，锗管约为70℃。使用时要注意散热条件。②集电极最大电流I_{CM}由$U_{CE}=1V$时达到P_{CM}的I_C值决定，此时β将明显下降。③反向击穿电压有多种，$U_{(BR)CBO}$表示发射极开路时集基极间的反向击穿电压，$U_{(BR)CEO}$表示基极开路时集射极之间的反向击穿电压，$U_{(BR)EBO}$表示集电极开路时基射极之间的反向击穿电压。

bandaoti zhengliu erjiguan

半导体整流二极管 (semiconductor rectifier diode)

用于整流的半导体二极管。半导体整流二极管按其结构的不同可分为点接触型和面接触型两类（结构及图形符号与半导体二极管相同）。点接触型整流二极管主要用于高频电路中，取其结面积小、结电容亦小的特点。在电力系统中，用得较多的是面接触型整流二极管。它的结面积大，故可通过较大的电流，其极间电容也大，常用于整流装置中（见整流电路），例如小功率的面接触型硅二极管，最大整流电流可为几百毫安，最高反向工作电压为几十伏，最高工作频率为几十千赫。大功率的整流二极管，最大整流电流为几十安到几百安，甚至数千安，最高反向工作电压有不同挡级，在几十伏到数千伏之间变化。

硅桥式整流组合管在电子设备中应用广泛，它是用4只硅整流二极管接成全波单相桥式整流电路，以塑料封装，如QSZ1A。其最大整流电流为1A，最高反向工作电压在30～1500V之间不等。

此外，还有一种高压硅整流器，用多只硅粒串接而成，用塑料封装，如2DL015/0.04。其反向工作电压为15000V，平均整流电流为40mA。

beiya zhengliu dianlu

倍压整流电路 (voltage-multiplier rectifier)

利用二极管的整流和导引作用，按极性相加原则，得到高于变压器二次侧峰值电压几倍以至更多倍数的直流输出电压的一种整流电路。电力工程中，有时需要工作电流小，但工作电压较高的直流电源，例如冲击电压发生器。为了避免因提高变压器二次侧电压而带来的困难，通常采用倍压整流电路获得所需的高压电源。

二倍压整流电路　电路图如图1所示。当变压器T的二次侧电压u_2为上负下正时，V1导通，电容C_1被充电至U_{C1}（左负右正）；当u_2为上正下负时，V2导通，电容C_2被充电至U_{C2}（上正下负）。当C_1和C_2的容量足够大，负载电阻R_L又很大时，则$U_{C1}=\sqrt{2}U_2$，$U_{C2}=2\sqrt{2}U_2$，$U_L=U_{C2}=2\sqrt{2}U_2$。

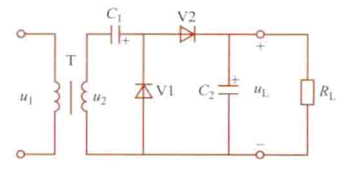


图1　二倍压整流电路

多倍压整流电路　电路图如图2所示。当变压器二次侧电压u_2上正下负（正半周）时，通过V1将C_1充电到$\sqrt{2}U_2$；当u_2为上负下正（负半周）时，U_{C1}和u_2的极性使两个电压相加，经过多次反复对C_2充电，将C_2两端电压充到近似为$2\sqrt{2}U_2$；而U_{C2}加上正半周时的u_2再减去U_{C1}经过V3多次反复向C_3充电，最后将C_3两端电压也充到近似为$2\sqrt{2}U_2$。依此类推，可知在此电路中，除电容C_1（$U_{C1}\approx\sqrt{2}U_2$）外，其余每一个电容两端的电压都是$2\sqrt{2}U_2$，因此把电容两端电压按极性相加的原则串联起来，就可得到所需的多倍压输出。

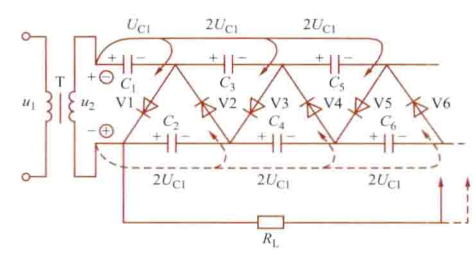


图2　多倍压整流电路

当输出电流I_L不为零时，多倍压整流电路的输出电压为

$$U_L=2\sqrt{2}nU_2-\frac{I_L}{fC}\left(\frac{2}{3}n^3+\frac{3}{4}n^2+\frac{n}{12}\right)$$

式中n是倍压整流的级数（图2所示电路$n=3$）；f是交流电源频率；U_2是变压器二次侧电压有效值；I_L是负载电流平均值。

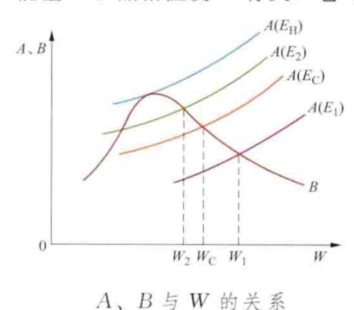
由于多倍压整流的输出电压是许多电容经过反复充电所形成的，所以，倍压级数越多，其输出脉动就越大，脉动系数$M=n(n+1)/4fCR_L$。

benzheng jichuan

本征击穿 (intrinsic breakdown)

温度较低、电压作用时间较短时，纯净、均匀固体电介质由绝缘状态突变为良导电状态的过程。本征击穿过程所需时间为10^{-8}s数量级，本征击穿场强大于1MV/cm，本征击穿反映了固体电介质本身固有的电气强度。

固体电介质中存在少量自由传导电子（处于导带能量状态的电子）。在电场作用下，传导电子一方面从电场获取能量，另一方面也将与固体电介质晶格发生碰撞而失去一部分能量。传导电子由电场获得的能量与电场强度E、电子本身能量W、晶格温度T有关，它与晶格碰撞时失去的能量也与W和T有关。若以A表示单位时间内传导电子由电场取得的能量，B表示单位时间内传导电子因与晶格碰撞而失去的能量，且若晶格温度T为定值，则A、B与W的关系如图所示，图中$E_H>E_2>E_C>E_1$。当外加电场大于E_H时，单位时间内传导电子获得的能量A始终大于失去的能量B，电子被加速，碰撞晶格时产生电离，使传导电子不断增加，电流急剧上升，最终导致固体电介质击穿。因此，E_H是一个临界值，大于此场强击穿一定发生。



A、B与W的关系

实际上，在外加电场小于E_H（如图中E_C）时仍有可能发生击穿。当外加电场为E_2时，因电子能量分布的统计规

律性，必有能量在 $W_2 \sim W_C$（W_C为电离能）之间的传导电子存在，由于 $A>B$，电子因能量不断增加而被加速，使晶格发生碰撞电离，产生新的电子；由于电子能量的统计分布，能量在 $W_2 \sim W_C$之间的电子数也会增加，并重复上述过程而使传导电子不断增加，最终使固体电介质击穿。

若外加电场为 E_1，因电子能量的统计分布，偶尔也会有能量大于 W_1的电子出现，但其出现概率甚低；能量大于 W_1的电子能使晶格发生碰撞电离，产生新的传导电子，因新产生的电子能量大于 W_1的概率极低，所以上述电子不断增加的过程不会出现，固体电介质也不会击穿。

bijiaoqi

比较器 （comparator） 比较两个模拟电压大小的集成电路。它用集成电路的输出电压的高低电平来表示比较的结果，广泛应用于波形变换、模拟与数字信号的转换以及控制与保护电路中。

比较器有单门限比较器和迟滞型比较器两种。

单门限比较器 原理电路如图 1（a）所示。设运算放大器 N（简称运放）的开环电压放大倍数为 A_{ud}，理想值为 $A_{ud}=\infty$；u_i为被比较的输入模拟电压。这里，运算放大器的同相输入端直接接地，故另一个和u_i进行比较的电压u_p为 0V，这个零伏电压又称基准电压 U_R。运算放大器 N 一旦工作在放大区，就有$u_o=A_{ud}(u_p-u_n)$，而且$u_p=0$；当$u_n=u_i-i_iR>0$ 时，u_o等于运算放大器的负向饱和值U_{-sa}，如图 1（b）所示。需要指出的是，此时运算放大器已工作在负向饱和状态（开关状态），运算放大器 N 已脱离放大区，公式$u_o=A_{ud}$（u_p-u_n）已不成立，但是，当u_i刚由 0V 向正方向增加的瞬间，运算放大器仍工作在放大区，上述公式还是适用的。相反，当u_i从+2V 朝负值变化，u_i在 0V 附近时，运算放大器又退出负向饱和区进入放大区，一旦$u_i<0$V 时，运算放大器又由放大区进入正向饱和区，此时$u_o=U_{+sa}$，如图 1（b）所示。可见，运算放大器输出电压发生跳变时的输入电压$u_i=U_{Th}=0$V，U_{Th}称为阈值电压，又叫门限电压。比较器只有一个阈值电压，故得名单门限比较器。一般情况下，运放的正、负饱和电压绝对值不相等，即 $|U_{+sa}| \neq |U_{-sa}|$。

同理，图 1（c）亦为单门限比较器，其门限电压 U_{Th}亦为 0V，与图 1（a）的区别在于：输入电压u_i接于同相输入端，其传输特性如图 1（d）所示。门限电压 U_{Th}不是 0V 的电路图如图 1（e）所示。输出电压u_o发生突变的条件仍然是 $u_p=u_n=0$V。在反相输入端应用叠加原理得 $u_n=u_i\frac{R_2}{R_1+R_2}+U_R\frac{R_1}{R_1+R_2}$，当$u_n=0$ 时，则$u_i=U_{Th}=-\frac{R_1}{R_2}U_R$，$U_R$ 是直接与u_i相比较的基准电压。调节R_1、R_2即可改变门限电压 U_{Th}之值。图 1（f）为其传输特性。

单门限比较器的缺点是抗干扰能力差。如图 1（b）所示，当$u_i<0$V 而接近于 0V 时，比较器的输出电压u_o应当稳定在 U_{+sa}上。但是，如果输入信号u_i中串入一个较小的正向干扰电压，则u_i加上干扰电压就可能达到或超过 U_{Th}（$U_{Th}=0$V），u_o就发生跳变，由 U_{+sa}变为U_{-sa}，这是误动作。

图 1 (b)、(d)、(f) 中u_o突变部分都画成垂直线，意思是$u_i=U_{Th}$时，u_o立即发生突变，实际上，由于运算放大器内部含有电容，尽管其值很小，但足以使u_o不可能突变。为了加快u_o的跳变速度和提高比较器的抗干扰能力，可采用迟滞型比较器。

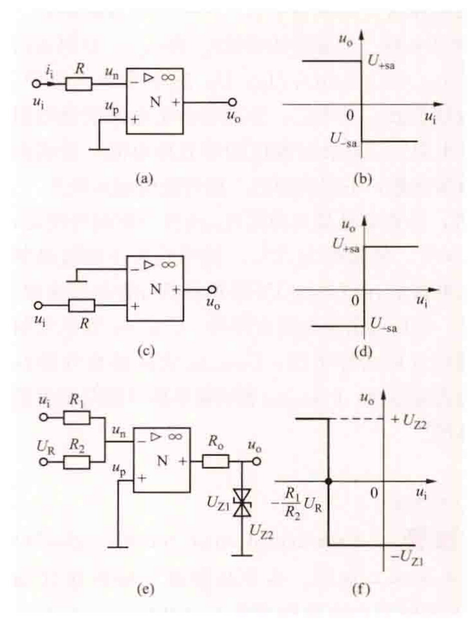


图 1 单门限比较器

(a) 反相输入比较器；(b) 图 (a) 的传输特性；(c) 同相输入比较器；(d) 图 (c) 的传输特性；(e) $U_{Th}\neq 0$ 时的反相输入比较器；(f) 图 (e) 的传输特性

迟滞型比较器 电路如图 2（a）所示，u_o通过R_3反馈到同相输入端，从而形成正反馈，加速了输出电压的跳变速度。U_R 为基准电压。u_o的突变仍然发生在$u_p=u_n$的瞬间，此时运算放大器工作在放大区，运算放大器 N 可看作是理想元件，故$u_n=u_i$，由叠加原理得$u_p=\frac{R_3U_R}{R_2+R_3}+\frac{R_2u_o}{R_2+R_3}$。当$u_p=u_n$时，$U_{Th}=u_i=u_p=\frac{R_3U_R}{R_2+R_3}+\frac{R_2u_o}{R_2+R_3}$。式中$u_o$有高低电平 $\pm U_Z$ 两个数值，代入上式可得两个门限电压：$U_{Th1}=\frac{R_3U_R+R_2U_Z}{R_2+R_3}$；$U_{Th2}=\frac{R_3U_R-R_2U_Z}{R_2+R_3}$。据此，可画出如图 2（b）所示的传输特性。因有两个门限电压，故又称双门限比较器。由图 2（b）得迟滞特性的宽度 $\Delta U=U_{Th1}-U_{Th2}=\frac{2R_2U_Z}{R_2+R_3}$，可见改变 R_2、R_3 之值，即可改变迟滞特性的宽度 ΔU 之值。

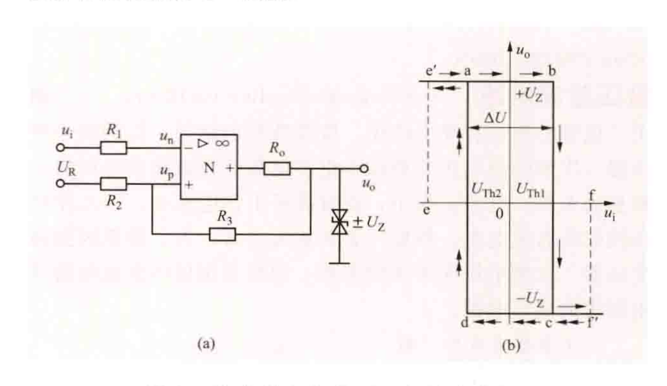


图 2 迟滞型比较器（双门限比较器）

(a) 电路图；(b) 传输特性

当u_i在 0e 段时，比较器工作在图 2（b）中的 e′点，此时，输出电压为$+U_Z$。设u_i从 0e 段逐渐增加到u_i在 0f 段，则比较器的工作点移动轨迹为：从 e′点开始，沿着单箭头指向经过 a 点继续朝 ab 方向移动，输出电压u_o仍保持$u_o=+U_Z$，当u_i继续增加到$u_i=U_{Th1}$时，u_o才从$+U_Z$ 突然下降到

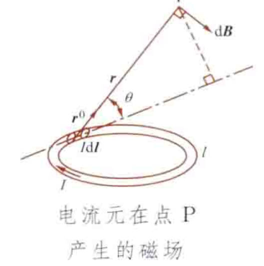
$-U_Z$，如图 2（b）中 bc 间的单箭头所示；当u_i继续增加到u_i在 0f 段时，工作点到达 f′点，并稳定在 f′点上，输出电压$u_o=-U_Z$。同理，当u_i从 0f 段逐渐下降到 0e 段时，比较器工作点移动的轨迹为 f′→c→d→a→e′，如图 2（b）中双箭头所示。双门限比较器的优点是提高了u_o的突变速度和抗干扰能力，例如当$u_i>U_{Th1}$而十分接近于U_{Th1}时，u_o能稳定在$-U_Z$上，此时，如果u_i中串入一个负向的干扰电压，只要这个干扰电压的绝对值小于 ΔU，u_o就不会突变，仍然能稳定在$-U_Z$上，从而避免了误动作。

Bi'ao－Safaer dinglü

毕奥-萨伐尔定律

（Biot-Savart law）　描述无限大真空中恒定电流产生磁场的定律。它是法国物理学家J. B. 毕奥（J. B. Biot，1774—1862）和 F. 萨伐尔（F. Savart，1791—1841）于 1820 年根据对载流回路周围的磁场进行实验研究得到的结果。后经 P.S. 拉普拉斯（P.S. Laplace，1749—1827）等人的工作，将定律表述为数学形式。如图所示，置于真空中的导线 l 中有恒定电流 I，$\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 是导线的长度元。电流元 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 在空间任意点 P 产生的磁通密度的数值 $\mathrm{d}B$ 与电流元至点 P 的距离 r 的平方成反比，与 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\sin\theta$ 的绝对值成正比（角度 θ 为电流元 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 与矢量 $\boldsymbol{r}$ 间的夹角），即

$$\mathrm{d}B=K\frac{|I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\sin\theta|}{r^2}$$



电流元在点 P 产生的磁场

式中比例系数 K 依赖于所采用的单位制。在国际单位制（SI）中，$K=\mu_0/(4\pi)$，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m 是真空磁导率。写成矢量式，毕奥-萨伐尔定律可表示为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{r}^0}{r^2}$$

式中 $\boldsymbol{r}^0$ 是从电流元指向点 P 的单位矢量。整个载流回路 l 在点 P 产生的磁通密度 $\boldsymbol{B}$，等于该回路的各个电流元所产生的 $\mathrm{d}\boldsymbol{B}$ 之矢量积分，即

$$\boldsymbol{B}=\oint_l \mathrm{d}\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\oint_l\frac{I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{r}^0}{r^2}$$

对于体电流分布，设 $\boldsymbol{J}$ 是电流密度，$\mathrm{d}V$ 是体积元，可用 $\boldsymbol{J}\mathrm{d}V$ 代替上式中的 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$，于是，毕奥-萨伐尔定律可写作

$$\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\int_V\frac{\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{r}^0}{r^2}\mathrm{d}V$$

如果载流回路周围空间中有介质存在，介质的磁化将影响空间的磁场（见磁场强度），此时，毕奥-萨伐尔定律失效。但从工程观点出发，除铁磁材料以外，其他介质的磁化效应很弱，常予忽略。因此，只要不存在铁磁材料，仍可应用毕奥-萨伐尔定律计算恒定电流产生的磁场。

bihuan xitong

闭环系统

（closed loop system）　见控制系统。

bianji chengxu

编辑程序

（editor）　用来建立文件，并对已有文件进行插入、删除、改写、替换、剪贴和复制等加工处理的一种实用程序。

编辑程序可依据不同的用户环境分为交互式编辑程序和批处理编辑程序两类。①交互式编辑程序。它由一系列编辑命令组成，用户通过终端键入编辑命令以执行相应的编辑操作。②批处理编辑程序。用户使用编辑宏指令构造编辑文件，通过编辑文件把编辑指令提供给编辑程序。

交互式编辑程序有两种操作方式：面向文件行的行编辑方式和全屏幕编辑方式。①面向文件行的行编辑方式。工作时先要找到编辑文件的相应行，然后才能进行编辑处理，编辑光标也只能在当前行内移动。早期的编辑程序都属于这一类。它具有结构简单，对系统环境要求低，可移植性好等特点，但使用不够方便。②全屏幕编辑方式。这种编辑程序将编辑命令以菜单形式显示在终端屏幕上，工作时用户点用相应的菜单即可进行编辑操作。终端屏幕对于用户来说是一个“窗口”，“窗口”内的内容是当前文件的可见部分，用户可以通过换页操作使这个“窗口”上下或左右移动，编辑光标亦可在屏幕上随意移动，因而具有较为舒适的操作环境和友善的用户界面。

编辑程序也可依据不同的编辑文件内容分为三类：正文编辑程序、图形编辑程序和图像编辑程序。①正文编辑程序。它以字符和文字为操作对象，产生由字符和文字组成的文件，可用其建立和加工程序文本和文稿。②图形编辑程序。它以图形信息为操作对象，具有图形生成、修改、变换、存取等功能，产生图形文件。③图像编辑程序。它主要以图像信息为操作对象，具有图像生成、修改、变换存取等功能，产生图像文件。

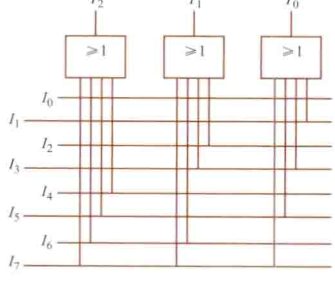
编辑程序除具有编辑功能外，还添加一些其他功能，用以增强处理能力。有些编辑程序具有较强的排版功能和单词拼写纠错等功能，构成为一个字处理软件；有些面向程序文件的编辑程序，应用了语法制导技术以及人工智能技术，使程序开发更为方便；有些编辑程序采用了多窗口技术，将终端屏幕分为多个窗口，同时处理多个文件，每一个文件对应一个窗口，不同窗口内的文件信息可相互传递。

bianmaqi

编码器

（encoder）　能将每一根输入线上的信号转换成输出端上的一个对应代码，即实现输入信号编码功能的组合逻辑电路。它广泛用于逻辑电路中。

图示是一个 8 线-3 线编码器的逻辑图，其中 $I_0\sim I_7$ 是 8 个输入，Y_2、Y_1、Y_0 是 3 个输出。当在某输入加上逻辑 1 信号时，便在 Y_2、Y_1、Y_0 给出一个对应的 3 位二进制代码。输入信号与输出代码的对应关系如表 1 所示。



8 线-3 线编码器的逻辑图

在图示编码电路中，任何时候只允许有一个输入信号是 1，否则电路不能正常工作。为克服这种局限性，便产生了优先编码器。设计优先编码器电路时，预先把所有的输入信号按优先权的高、低排队，当两个以上输入信号同时为 1

时，只对其中优先权最高的一个进行编码。表2是8线-3线优先编码器功能表，表中的“×”表示既可以是逻辑0，也可以是逻辑1。从表2中不难看出，输入信号 I_7 的优先权最高，I_0 的优先权最低。例如当 $I_7=1$ 时，无论 $I_6 \sim I_0$ 当中还有多少个是1，电路只对 I_7 进行编码，使输入为 $Y_2Y_1Y_0=111$。

表1 电路功能表

I_0	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	Y_2	Y_1	Y_0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

表2 8线-3线优先编码器的功能表

I_0	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	Y_2	Y_1	Y_0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
×	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
×	×	1	0	0	0	0	0	0	1	0
×	×	×	1	0	0	0	0	0	1	1
×	×	×	×	1	0	0	0	1	0	0
×	×	×	×	×	1	0	0	1	0	1
×	×	×	×	×	×	1	0	1	1	0
×	×	×	×	×	×	×	1	1	1	1

bianyi chengxu

编译程序 (compiler) 把用高级程序设计语言书写的源程序翻译成等价的汇编语言或机器语言表示的目标程序的处理程序。前者是面向人的高级语言，称源语言；后者是面向硬件（机器）的语言，称目标语言。在执行目标程序的计算机上，运行编译产生的目标程序，就可以得到同执行源程序一样的结果。

工作原理 编译程序主要由两大部分组成：分析与综合。

分析 由词法分析、语法分析与语义分析三个阶段组成。

(1) 词法分析：其任务由词法分析程序完成。词法分析程序读入源程序的字符，识别出一个个单词（包括标识符、保留字、常数、算符、界符等），查填符号表，检查一致性，产生为编译下一阶段易于使用的源程序内部形式的代码。

(2) 语法分析：编译程序工作的控制核心。接收由词法分析输出的源程序内部形式的代码，根据源语言的语法定义规则，分析源程序的语法结构，检查源程序的语法是否正确，还可以生成关于该源程序的语法树。词法分析与语法分析都有很好的形式化模型，因此，给出源语言以后，可以自动生成该语言的词法分析与语法分析程序。词法分析的形式模型是有限状态自动机，语法分析的形式模型是下推自动机。

(3) 语义分析：其目的是对语法树上的节点附上必要的反映其意义的语义特征信息，把必要的类型信息收集和保存在符号表中，对语法正确的程序进一步从语义上确定其是否合法，进行必要的语义处理。因此，这一阶段的输入是前一阶段的输出，这一阶段的输出，是比前一阶段高一级的中间语言代码。语义分析的形式模型主要有属性文法与指称语义。

综合 任务是根据分析产生的中间语言代码及符号表产生目标程序，其中包括代码优化，存储空间分配，目标指令生成。代码优化是通过转换中间语言代码，达到节省目标程序的运行时间与存储空间的目的。

在编译过程的任何阶段，都可能查出源程序的错误。为了尽可能多地一次性查出这些错误，须进行必要的出错处理，尽可能准确地查出语法错误、语义错误，指出错误性质和位置。

结构 编译过程分为词法分析、语法分析、语义分析、中间代码生成、优化、目标代码生成六个逻辑步骤。可按这些步骤来设计编译程序的结构，每个步骤组织成若干个任务单一的程序模块。按以上六个逻辑步骤的顺序控制这些程序模块的运行，也可以按程序模块调用方式进行。在具体设计中，常常把编译过程分为若干遍来实现。将源程序或中间语言代码，从头至尾扫视一次，并做相应的工作称为一遍（或趟）。一个编译程序分几遍实现，要根据源语言的复杂程度、目标机大小及编译程序的人员分工情况来确定。

构造方法 构造编译程序的方法有多种，最一般的方法是用机器语言或汇编语言编写编译程序。这种方法虽然工作量大、易出错，但编译出的目标程序运行效率高。用高级语言编写编译程序可以节省大量编译时间，生成的编译程序也易于阅读、修改和移植。采用编译程序的编译方法，它接收关于被编译的语言的词法规则、语法规则、语义规则和代码生成规则的描述产生编译程序。自编译方法是先对被编译语言的核心部分编写其编译程序，再以它为工具扩展形成整个编译程序，通过移植方法把某一机器上的编译程序移植到另一机器上去。

bianfenfa

变分法 (calculus of variations) 研究泛函极值问题的数学方法。变分在泛函的研究中所起的作用，与微分在函数的研究中所起的作用类似。

泛函的变分 设泛函 $J(\boldsymbol{x})$ 在 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_0$ 处可微分，即存在 $J'(\boldsymbol{x})\Big|_{x=x_0}=\dfrac{\partial J(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\Big|_{x=x_0}$，则称 $(\Delta\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}\cdot J'(\boldsymbol{x})\big|_{x=x_0}$ 为泛函 $J(\boldsymbol{x})$ 在 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_0$ 处的一阶变分（$\Delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_0$），并表示成 $\delta J(\boldsymbol{x}_0,\Delta\boldsymbol{x})=(\Delta\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}\cdot J'(\boldsymbol{x})\big|_{x=x_0}$。在任意 $\boldsymbol{x}$ 处，则 $\delta J(\boldsymbol{x},\Delta\boldsymbol{x})=(\Delta\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}\cdot J'(\boldsymbol{x})$。将 $J(\boldsymbol{x})$ 在 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_0$ 邻域展开成泰勒级数 $J(\boldsymbol{x})=J(\boldsymbol{x})\big|_{x=x_0}+(\Delta\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}\cdot J'(\boldsymbol{x})\big|_{x=x_0}+\cdots$，可见一阶变分为泛函增量的线性主部。

泛函变分还可以由下式表示：$\delta J(\boldsymbol{x},\Delta\boldsymbol{x})=\varepsilon\dfrac{\partial}{\partial\varepsilon}J(\boldsymbol{x}+\varepsilon\Delta\boldsymbol{x})\big|_{\varepsilon=0}$，式中 ε 为参变量，但不是时间函数。二阶变分 $\delta^2 J(\boldsymbol{x},\Delta\boldsymbol{x})=\dfrac{1}{2!}\boldsymbol{\varepsilon}^2\cdot\dfrac{\partial^2}{\partial\varepsilon^2}J(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\varepsilon}\Delta\boldsymbol{x})\big|_{\varepsilon=0}$。

泛函 $J(\boldsymbol{x})$ 在 $\boldsymbol{x}_0$ 处达到极小值的必要条件为

$$\delta J(\boldsymbol{x}_0,\Delta\boldsymbol{x})=0 \tag{1}$$

其充分条件为式(1)成立，且

$$\delta^2 J(\boldsymbol{x}_0,\Delta\boldsymbol{x})>0 \tag{2}$$

泛函极值

固定边界的泛函极值 设泛函为积分型

$$J(x)=\int_{t_0}^{t_f} g[x(t),\dot{x}(t),t]\mathrm{d}t \tag{3}$$

设 $x(t)$ 为一维变量，在 $t\in[t_0,t_f]$ 区间上二次可导，

并且 $x(t_0)=x_0$ 和 $x(t_f)=x_f$ 均给定。

经过推导，可得，最优轨线 $x^*(t)$ 必须满足下述著名的欧拉—拉格朗日方程，简称欧拉方程

$$\frac{\partial g(x^*,\dot{x}^*,t)}{\partial x}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\frac{\partial g(x^*,\dot{x}^*,t)}{\partial \dot{x}}\right]=0 \tag{4}$$

欧拉方程是一个二阶微分方程，求解过程中要确定两个积分常数，因此要用到两个边界条件，这里边界条件是 $x(t_0)=x_0$ 和 $x(t_f)=x_f$。

对于下列形式的被积函数 $g(x,\dot{x}),g(\dot{x},t),g(\dot{x})$，相应的欧拉方程求解较为容易。

可动边界的泛函极值　t_0 与 t_f 仍为固定，边界点可以变动。在这种情形下，欧拉方程仍然是必要条件。下列"横截条件"

$$\left.\frac{\partial g(x^*,\dot{x}^*,t)}{\partial \dot{x}}\right|_{t_0}=0;\left.\frac{\partial g(x^*,\dot{x}^*,t)}{\partial \dot{x}}\right|_{t_f}=0 \tag{5}$$

给出了边界条件。

终端状态及时刻自由的泛函极值　当终端状态可动且终端时刻 t_f 为自由时，欧拉方程仍须满足，但应采用不同的边界条件及横截条件。

有约束条件的泛函极值问题　用拉格朗日乘子法转化为无约束条件问题来解决。

对于以上几种情况，结论完全可以推广到 $x(t)$ 为向量的场合。

用变分法解最优控制问题　设系统状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}(t),t] \tag{6}$$

性能指标为

$$J=h[\boldsymbol{x}(t_f),t_f]+\int_{t_0}^{t_f}g[\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}(t),t]\mathrm{d}t \tag{7}$$

并设，初始时刻 t_0 及终端时刻 t_f 给定，$\boldsymbol{x}(t_0)=\boldsymbol{x}_0$，终端状态不受约束，求使 J 达到极值时的最优控制规律 $\boldsymbol{u}^*(t)$ 及最优状态轨线 $\boldsymbol{x}^*(t)$。

先用拉格朗日乘子法化成无约束条件问题，并定义哈密顿函数如下

$$H(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},\boldsymbol{\lambda},t)=g(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t)+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t) \tag{8}$$

即原问题化为求下列泛函的极值

$$J_a=h[x(t_f),t_f]+\int_{t_0}^{t_f}[H(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},\boldsymbol{\lambda},t)-\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{x}}]\mathrm{d}t \tag{9}$$

可以根据泛函极值条件，写出变分的表达式，并令 $\delta J_a=0$，于是，要求下列诸式同时满足

$$\dot{\boldsymbol{x}}^*(t)=\frac{\partial H(\boldsymbol{x}^*,\boldsymbol{u}^*,\boldsymbol{\lambda}^*,t)}{\partial \lambda} \tag{10}$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}^*(t)=-\frac{\partial H(\boldsymbol{x}^*,\boldsymbol{u}^*,\boldsymbol{\lambda}^*,t)}{\partial x} \tag{11}$$

$$\frac{\partial H(\boldsymbol{x}^*,\boldsymbol{u}^*,\boldsymbol{\lambda}^*,t)}{\partial \boldsymbol{u}}=0 \tag{12}$$

$$\boldsymbol{\lambda}^*(t_f)=\frac{\partial h[\boldsymbol{x}^*(t_f),t_f]}{\partial \boldsymbol{x}(t_f)} \tag{13}$$

这里，式（10）～式（12）即为欧拉方程。其中，式（10）即状态方程，式（11）为共态方程，式（10）、式（11）合称为哈密顿正则方程（或规范方程）；式（12）为控制方程。式（13）为横截条件。联立求解式（10）～式（13），可得 $\boldsymbol{u}^*(t)$ 和 $\boldsymbol{x}^*(t)$。

对于其他不同边界情况以及考虑存在终端等式约束等情况，可用类似的方法进行推导。

bianhuanqishi dianbiao

变换器式电表

变换器式电表　(transducer type meters)　将各种交流被测对象如电流、电压、功率、频率和功率因数等，经变换电路转换成与其有一定函数关系的直流电流或电压，然后用磁电系测量机构进行测量的机械式指示电表。表盘按交流被测对象刻度。

变换器式电表包括整流式电表、变换器式电压表、变换器式功率表、变换器式功率因数表及变换器式频率表等。

整流式电表　采用半导体整流器件和磁电系测量机构（也称表头）组合而成，通常包括半波整流电路或全波整流电路，如图 1 所示。图 1（a）中，电流只在半个周期中经过二极管 V1 和表头，另半个周期的电流通过与表头并联的二极管 V2。V2 保护 V1 在电压反向时不被击穿。图 1（b）为全波整流电路，由于两个半波均被利用，通过表头的电流增为 2 倍，提高了电表的灵敏度。

整流式电表按正弦波有效值刻度。当被测对象波形有畸变时，将产生较大误差。利用分流器可组成大量程交流电流表；串联倍压电阻可构成大量程交流电压表。

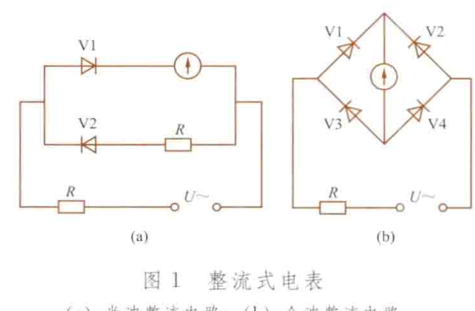


图 1　整流式电表

(a) 半波整流电路；(b) 全波整流电路

变换器式电压表　被测交流电压由变换器转换为正比于电压有效值的直流电流，然后用磁电系表头进行测量的电表，其原理框图见图 2。为正确反映电压的有效值，变换器采用折线逼近式原理，其输出接以 500μA 或 1mA 的表头。

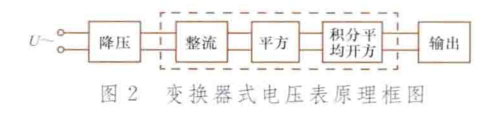


图 2　变换器式电压表原理框图

变换器式功率表　以变换电路将被测交流功率变换成直流电流或电压，用磁电系测量机构进行测量的电表。

基于时分割乘法器的变换器式功率表的原理框图见图 3。电流变换及补偿电路将被测电流 i_x 变换成电压 u_y，用阻容移相网络补偿被测电压 u_x 与被测电流 i_x 之间在变换过程中产生的相位误差。电压变换电路将被测电压 u_x 变换成与其成比例的电压后，输入脉冲调宽电路。时分割乘法器由脉冲调宽电路与开关电路组成（图 3 中虚线框内部分），完成被测电压与被测电流的相乘。乘法器的输出电压 U_o 经低通滤波器变成直流电流（或电压），由表头显示被测交流功率的大小。

时分割乘法器的脉冲调宽电路由积分器和方波发生器组成。被测电压通过变换加到积分器上进行积分，经

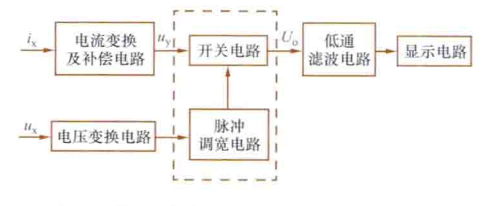


图 3　基于时分割乘法器的变换器式功率表原理框图

方波发生器产生一脉宽可调的方波。此方波反馈到积分器输入端作为调制信号。经过与被测信号总加后，使方波发生器输出方波的宽度正比于被测电压u_x。输出方波同时作为开关电路的控制信号，控制反映被测电流的电压u_y的通断，从而使时分割乘法器的输出电压U_o既与被测电压u_x成正比，也与反映被测电流的电压u_y成正比，即完成了$u_x u_y$的相乘。输出电压U_o正比于被测功率，$U_o = K\int_0^T u_x u_y \mathrm{d}t = K'\int_0^T u_x i_x \mathrm{d}t$，即被测交流电压、电流瞬时值在整个周期$T$的积分，其平均直流信号正比于有功功率。

变换器式功率因数表　利用变换电路将被测相角差（或功率因数）转换为相应大小的直流电流，然后用表头进行测量的电表。

三相变换器式功率因数表由相敏整流电路和中间指零（双向偏转）的表头组合而成，其变换电路如图4（a）所示。电阻R_1、R_2和稳压管V5、V6组成桥式电路，与分流电阻R_4并联的表头接在桥路的测量对角线上；二极管V1、V2组成输入电压$\underline{U}_{CB}$的半波整流电路；电阻R_3为降压电阻；二极管V3、V4实现电流回路的双向整流；电流互感器用来降低电流值，在其一次绕组通A相电流$\underline{I}_A$时，其二次绕组将产生成正比的电压$\underline{U}_{IA}$。

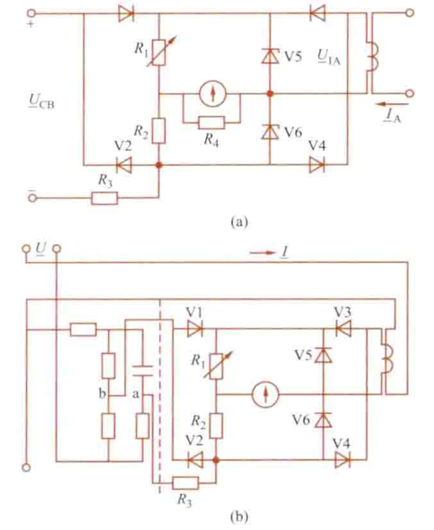


图4　变换器式功率因数表
(a) 三相式；(b) 单相式

在只有电压$\underline{U}_{CB}$作用时，调节R_1使电表指零。当只通过电流$\underline{I}_A$时，对于正半周，二极管V3导通，所产生的电压在V5处稳压限幅；对于负半周，V4导通，在V6处稳压限幅。二极管V3和V4交替导通，使表头在一个周期内通过大小相等、方向相反的两个半波电流，因此无指示。

当将具有相位差$\frac{\pi}{2}+\varphi$的电压$\underline{U}_{CB}$和电流$\underline{I}_A$同时接入电表时，通过表头的电流的平均值$I_0 \propto 2\varphi$。

若负载为纯电阻，即$\varphi=0$，则通过表头的平均电流为零，表头指针处在中间位置。如负载是感性的，$I_0>0$，指针顺时针方向偏转；负载为容性的，则$I_0<0$，指针逆时针偏转。如此，表头刻度盘即可按功率因数（或相位）刻度。

测量单相电路的功率因数（或相位差）时，为使表头仍能双向偏转，必须添加相移$\pi/2$的网络，如图4（b）虚线左侧部分所示。相移网络的输入电压为电网电压，输出电压在相位上超前输入电压$\pi/2$。此时，负载为感性的，表头指针顺时针方向偏转；负载为容性的，指针逆时针偏转。

变换器式频率表　利用变换电路将被测频率转换为一定大小的直流电流，然后用表头进行测量的电表。将频率转换成直流电流的方法很多，常用的是充放电型变换电路，其原理电路见图5。R_1为降压电阻，也作为稳压管V1、V2的调节电阻，它们组成降压整形（限幅）电路，将被测频率为f的正弦电压变成近似的方波电压，其幅值等于稳压管的稳定值U_Z。当被测电压变化时，由于稳压管的作用，输出方波电压的幅值基本保持不变。

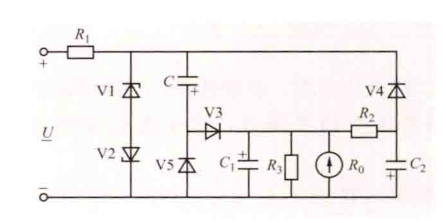


图5　变换器式频率表

由微分电容C、整流二极管V3和磁电系微安级表头组成充放电电路，电解电容C_1起滤波作用。稳定情况下，在被测电压的负半周，电容C充有电荷CU_Z，极性如图5中所示；在随后的正半周，有电流i通过电容C和表头，使电容C先放电再充电到相反极性。如此，通过表头的电荷为$2CU_Z$。由于充放电电路的时间常数R_0C（R_0为表头内阻）比被测交流电压的周期小得多，i实际为一尖脉冲。磁电系表头的转动惯量较大，只反映i的平均值，其值为$I_{av}=2U_ZCf$。由于U_Z和C的值不变，则平均电流与被测频率成正比，因此表头的指示反映被测频率的数值。

变换器式频率表大多为配电盘式电表，用于测量电网频率，测量范围通常为45～55Hz。为使该电表刻度的起始点为45Hz，在其中加入下量限调整电路即偏置电路。它由电容C_2、表头、电阻R_2和二极管V4构成。稳压管两端的电压U_Z为负值时，二极管V4导通，表头中有与I_{av}方向相反的电流通过，同时对电容C_2放电，其极性为上正下负。当U_2为正值时，电容C_2对R_2放电，其方向与I_{av}仍相反。总的反向电流平均值为I_2。调节电阻R_2使I_2等于45Hz时的I_{av}。如此，当被测频率为45Hz时，通过表头的平均电流为零，电表指示在零位上，即对应的频率便为45Hz。当频率增加时，I_{av}增大，调节电阻R_3使被测频率为55Hz时，电流平均值为满偏转电流。这样，该频率表的测量范围便为45～55Hz。

bianhuanqishi dianyabiao

变换器式电压表　(transducer type voltmeter)

见变换器式电表。

bianhuanqishi gonglübiao

变换器式功率表　(transducer type power wattmeter)

见变换器式电表。

bianhuanqishi gonglüyinshubiao

变换器式功率因数表　(transducer type power factor meter)

见变换器式电表。

bianhuanqishi pinlübiao

变换器式频率表　(transducer type frequency meter)

见变换器式电表。

bianliang-tidufa

变量-梯度法 (variable-gradient method) 对非线性系统 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$，$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{0})=\boldsymbol{0}$ 选择李雅普诺夫函数的一种方法。

令 $V(\boldsymbol{x})$ 为一备择的李雅普诺夫函数（见李雅普诺夫方法），$\dot{V}(\boldsymbol{x})$ 可表示为

$$\dot{V}(\boldsymbol{x})=\frac{\partial V}{\partial x_1}\dot{x}_1+\frac{\partial V}{\partial x_2}\dot{x}_2+\cdots+\frac{\partial V}{\partial x_n}\dot{x}_n \tag{1}$$

令

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})=\mathrm{grad}V(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix}\partial V/\partial x_1\\ \partial V/\partial x_2\\ \cdots\\ \partial V/\partial x_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}g_1(\boldsymbol{x})\\ g_2(\boldsymbol{x})\\ \cdots\\ g_n(\boldsymbol{x})\end{bmatrix} \tag{2}$$

于是，式（1）可写作

$$\dot{V}(\boldsymbol{x})=[\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})]^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{x}} \tag{3}$$

对上式两边积分，可得李雅普诺夫函数

$$\begin{aligned}V(\boldsymbol{x})&=\int_0^t\frac{\mathrm{d}V(\boldsymbol{x})}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t\\&=\int_0^t[\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})]^{\mathrm{T}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t\\&=\int_0^x[\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})]^{\mathrm{T}}\mathrm{d}\boldsymbol{x}\end{aligned} \tag{4}$$

这是从状态空间原点到一任意点 $(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 的线积分。由式（3）有 $[\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})]^{\mathrm{T}}\mathrm{d}\boldsymbol{x}=\mathrm{d}V(\boldsymbol{x})$，式（4）中的积分与积分路径无关。最简单的积分路径是沿状态向量 $\boldsymbol{x}$ 的诸分量方向 $(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 顺序进行式（4）中积分的计算，即

$$\begin{aligned}V(\boldsymbol{x})=\int_0^x[\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})]^{\mathrm{T}}\mathrm{d}x&=\int_0^{x_1}g_1(\theta_1,0,\cdots,0)\mathrm{d}\theta_1\\&+\int_0^{x_2}g_2(x_1,\theta_2,0,\cdots,0)\mathrm{d}\theta_2+\cdots\\&+\int_0^{x_n}g_n(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_{n-1},\theta_n)\mathrm{d}\theta_n\end{aligned} \tag{5}$$

于是，变量-梯度法工作就要选择一向量函数 $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})$ 并将这一函数按式（5）积分以获得标量函数 $V(\boldsymbol{x})$。连续向量 $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})$ 要作为标量函数 $V(\boldsymbol{x})$ 的梯度，必须有

$$\partial g_i/\partial x_j=\partial g_j/\partial x_i;i,j=1,2,\cdots,n \tag{6}$$

构造李雅普诺夫函数的步骤：

（1）对于梯度向量 $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})$，先假设为

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix}g_1(\boldsymbol{x})\\ g_2(\boldsymbol{x})\\ \cdots\\ g_n(\boldsymbol{x})\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11}x_1+a_{12}x_2+\cdots+a_{1n}x_n\\ a_{21}x_1+a_{22}x_2+\cdots+a_{2n}x_n\\ \cdots\quad\cdots\quad\cdots\\ a_{n1}x_1+a_{n2}x_2+\cdots+a_{mn}x_n\end{bmatrix} \tag{7}$$

a_{ij} 待选，可以是常数，也可以是状态变量和 t 的函数，选常数较为方便。

（2）经式（3）构造 $\dot{V}$，选各 a_{ij} 使它负定，至少负半定。

（3）确定其他的 a_{ij}，以满足式（6）。

（4）校核 $\dot{V}$，因为步骤（3）可能改变了它的符号确定性。

（5）用式（5）积分以确定 V。

（6）确定系统的平衡状态稳定的范围。

例如，用变量-梯度法构造下述系统的李雅普诺夫函数：$\dot{x}_1=-x_1+2x_1^2x_2$；$\dot{x}_2=-x_2$，则首先设 V 的梯度为

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix}a_{11}x_1+a_{12}x_2\\ a_{21}x_1+2x_2\end{bmatrix}$$

于是

$$\begin{aligned}\dot{V}&=(a_{11}x_1+a_{12}x_2)\dot{x}_1+(a_{21}x_1+2x_2)\dot{x}_2\\&=-a_{11}x_1^2+2a_{11}x_1^3x_2-a_{12}x_1x_2\\&\quad+2a_{12}x_1^2x_2^2-a_{21}x_1x_2-2x_2^2\end{aligned}$$

试取 $a_{11}=1$，$a_{12}=a_{21}=0$，则 $\dot{V}=-x_1^2(1-2x_1x_2)-2x_2^2$。若 $1-2x_1x_2>0$，则 $\dot{V}$ 负定，这就是约束条件。

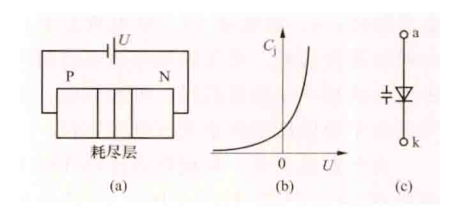
此时，$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix}x_1\\ 2x_2\end{bmatrix}$，$\partial g_1/\partial x_2=\partial g_2/\partial x_1=0$，满足式（6）。于是得 $V=\int_0^{x_1}\theta_1\mathrm{d}\theta_1+\int_0^{x_2}2\theta_2\mathrm{d}\theta_2=\frac{1}{2}x_1^2+x_2^2$。在 $1-2x_1x_2>0$ 范围内，系统的平衡状态是稳定的。

若另取 $a_{11}=\frac{2}{(1-x_1x_2)^2}$，$a_{12}=\frac{-x_1^2}{(1-x_1x_2)^2}$，$a_{21}=\frac{x_1^2}{(1-x_1x_2)^2}$，则可求得另一个 V 函数 $\frac{x_1^2}{1-x_1x_2}+x_2^2$，约束条件为 $1-x_1x_2>0$，比前一个还好。

bianrong erjiguan

变容二极管 (variable capacitance diode; varactor)

用作受电压控制的可变电容器的半导体二极管。如图（a）所示，由于在PN结上加上了反向偏压，形成耗尽区，在耗尽区的两侧都有电荷，因而它的特性和平板电容器的特性一样。



变容二极管

(a) 原理图；(b) 容压特性；(c) 图形符号

耗尽层的厚度随所加的反向偏压而变化，可以通过改变反向偏压形成一个可变结型电容器。对于一个突变型PN结，结的可变电容 C_j 为

$$C_j=\frac{C_0}{(U_i+|U|)^{1/2}}$$

式中 C_0 是一个与掺杂量及结面积有关的常数；U_i 是约为1V的结内电压；$|U|$ 是反向偏压的模。

对于缓变结型变容二极管，要用立方根符号代替上式中的平方根符号。对于突变型PN结，C_j 的典型值在50～100pF之间变化；对于缓变型PN结，C_j 的典型值为5～50pF。典型容压特性如图（b）所示，图（c）是它的图形符号。

变容二极管在产生调频信号的调频器中和作低噪声放大的参数放大器中得到了广泛应用。

bianyaqi jueyuan de zaixian zhenduan

变压器绝缘的在线诊断 (on-line insulation diagnosis of transformer) 对运行状态下的变压器绝缘进行试验和各种特性测量，分析其特征，并对绝缘状态作出判断的技术。推行和发展变压器绝缘在线诊断技术，能在早期发现故障，提高变压器的运行可靠性。充油变压器绝缘在线诊断的项目有：①局部放电；②油中溶解气体；③电容套管介质特性。

图示为1000kV、3×1000MVA单体式变压器。

局部放电　测量变压器局部放电有两种方法：电脉冲信号法（见局部放电试验）和超声信号法。



1000kV、3×1000MVA 单体式变压器

在线监测变压器局部放电电脉冲信号要考虑传感器的选择及变压器运行现场强烈电磁干扰的抑制问题。通常采用罗戈夫斯基线圈型电流传感器来检测放电脉冲信号，将电容套管、变压器外壳或铁芯接地线穿越传感器的磁芯可取得放电信号。传感器的输出信号经放大、滤波、数据采集后送计算机分析、储存。为了抑制电磁干扰，要采取数字滤波等措施。可根据视在放电量或根据 φ-q-n（φ：放电发生时的工频电压相位；q：放电量；n：放电重复率）三维谱图用人工神经网络进行判断。变压器局部放电的超声信号由装在变压器外壳上的超声传感器取得。可根据电、声信号的时延和声信号在油中的传播速度来对放电源定位。

油中溶解气体　在放电或过热作用下，充油变压器的油浸纸绝缘会产生 H_2、CH_4、C_2H_6、C_2H_4、C_2H_2、CO、CO_2 等气体，并逐渐溶解于油中，可根据油中溶解气体的成分和浓度来进行诊断。由于油中溶解气体浓度很低，一般采用气相色谱仪进行分析，分析流程为：①从变压器的油中脱出气体，或由变压器取出油样再脱出气体；②脱出气体由载气推动通过色谱柱而被分离；③气体鉴定（成分、浓度测定）。利用高分子薄膜的透气性可将变压器油中的气体分离出来。用定量的空气循环吹入油样，也可将油中溶解气体析出。气体鉴定采用半导体气敏传感器或燃料电池。可根据半导体气敏传感器接触气体后电气性能的变化来鉴定气体，例如接触 H_2 后，根据 SnO_2 的电阻或钯栅场效应管阈值电压的变化来鉴定。燃料电池由一对电极和电解液（如 H_2SO_4 溶液）组成，可根据电化学反应产生的电流正比于导入 H_2 浓度的现象来鉴定油中溶解的 H_2。中国国家标准和国际电工委员会推荐用 5 种气体浓度的 3 个比值：C_2H_2/C_2H_4、CH_4/H_2、C_2H_4/C_2H_6 来判断故障的性质。

电容套管介质特性　电容套管是一种电容型设备，根据它的介质特性进行的诊断参见电容型绝缘的在线诊断。

bianxieshi jisuanji

便携式计算机

（portable computer）　一种轻便可携带的个人微型计算机，简称为便携机。这是个人微型计算机向更加轻、薄、短、小发展而形成的计算机。

20 世纪 80 年代初推出手提式微型计算机，但限于当时的技术水平，性能、结构并不理想。80 年代中先后推出使用双软盘驱动器的便携机及有硬盘驱动器的便携机，使手提式计算机达到了台式机的功能。90 年代以后，笔记本型计算机采用了 32 位高速微处理器芯片，几千兆字节的超薄、小直径硬盘，真彩色液晶显示屏，还提供标准扩展插槽，可配置传真/调制解调器卡和网络卡等，既具有杰出的多媒体功能和高度的通信能力，又增加了浏览因特网的功能，用户可通过便携机浏览 Web。

便携机按体积和重量的大小有可移动式、膝上型、笔记本型（见图 1）、口袋型、掌上型（见图 2）、笔型等几种。



图 1　笔记本电脑



图 2　掌上电脑

与便携机相关的技术有处理器芯片和必要的配套设备。①高性能的处理器芯片。②小体积、大容量硬盘。③便携式小型打印机。④薄膜晶体管或超扭曲的彩色液晶显示器。⑤高容量电池。⑥微组装技术。

biaozhun dianchi

标准电池

（standard cell）　保存和传递电压单位伏特量值的标准量具，或用于精密仪器中作为提供标准电压量值的元器件。

标准电池利用化学反应产生电动势，按硫酸镉电解液的浓度，分为饱和标准电池与不饱和标准电池。饱和标准电池具有良好的稳定性，常作为标准量具；不饱和标准电池的稳定性较差，常用作携带型仪器的内附标准电压元器件。标准电池一般采用 H 型结构，也可制成单管型结构（见图 1）。图 2 所示为标准电池外观，图 3 所示为电动势副基准装置，图 4 所示为量子电压基准。

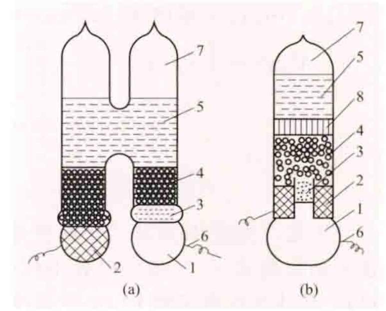


图 1　饱和标准电池

(a) H 型结构；(b) 单管型结构

1—汞（电池正极）；2—10%镉汞膏（电池负极）；3—硫酸亚汞（去极化剂）；4—硫酸镉结晶体；5—硫酸镉饱和溶液；6—铂引线；7—玻璃容器；8—微孔塞片



图 2　标准电池外观图

标准电池的电动势值随温度的变化而变化。饱和标准电池正极的温度系数约为 $+310\mu V/℃$，负极的温度系数约为 $-350\mu V/℃$。在 20℃下，标准电池的温度系数约为 $-40\mu V/℃$。中国提出在 0～40℃范围内，标准电池“电动势-温度”公式为 $E_t = E_{20} - 39.94\times10^{-6}(t-20) - 0.929\times10^{-6}(t-20)^2 + 0.0090\times10^{-6}(t-20)^3 - 0.00006\times10^{-6}(t-20)^4$ (V)。不饱和标准电池正、负极温度系数相互补偿，

其 20℃下的温度系数约为−1～−5μV/℃。

温度发生突变时，标准电池的电动势不可能迅速变化，需要一定时间才达到新的温度下的电动势值，这种现象称为滞后效应。

检定和使用标准电池时，环境温度必须恒定，且应保持标准电池的正、负极处于同一温度。若正、负极之间的温度差为 0.1℃，就有约 30μV 的电动势偏差。

图 3 电动势副基准装置——标准电池

要防止标准电池过量充放电，会导致极化而引起其电动势不稳定。不允许用仪表直接测量标准电池的电动势，更不能接错极性。标准电池不能受到阳光、灯光的直接照射，且不能受到激烈振动。



图 4 量子电压基准

利用齐纳二极管的端电压与反向电流在小范围内波动几乎无关的特性，可将其作为电动势标准，用于仪器中代替标准电池。

biaozhun dianganqi

标准电感器 (standard inductor) 保存和传递电感单位亨利量值的标准量具。它包括标准自感器和标准互感器。在交流电磁测量中常作为自感和互感的标准量具，或安装在电磁测量仪器中作为精密自感和互感元器件。

标准电感器的量值通常是十进制的，其电感量范围一般从 1μH 到 1H，特殊情况下也可制成更小或更大数值，或非十进制数值。

作为计量标准用的标准电感器，按其在量值传递系统中的位置分为国家基准、工作基准及一般标准量具三挡。较低挡标准电感器的量值由较高挡传递。图 1 所示为电感工作基准。



图 1 电感工作基准装置

电感标准量具按准确度分级。中国的标准电感器从 0.01～1.0 级共分 7 个级别（0.01，0.02，0.05，0.1，0.2，0.5，1.0）。例如 0.01 级标准电感器的误差低于±0.01%。

标准电感器是有骨架的线圈，骨架采用具有良好绝缘性能及几何尺寸稳定的材料制作，如大理石、高频瓷、优质硬塑料等。外壳及端钮均应选用非磁性材料制作。标准自感器由一个单层或多层线圈构成；标准互感器则有一次和二次共两个线圈，结构稍复杂。

标准电感器线圈的电阻和分布电容对其性能有较大影响。图 2 画出了考虑这些因素后，在一定频率范围内标准自感器的等值电路。线圈电阻 r 使标准自感器的品质因数 $Q=\omega L/r$ 值降低，在频率较低时尤为严重。分布电容 C 则使自感量随频率而变化；频率较高时更为明显。图 3 为在一定频率范围内的标准互感器等值电路，可见，同样存在线圈电阻及分布电容。线圈电阻 r_1 和 r_2 对互感值的影响很小，当一次侧电流是正弦时，二次侧的开路电压与一次侧电流的相角差接近 90°。所以标准互感器也常作为标准的 90°移相器使用。标准互感器的另一种重要用途是在磁测量中给出标准磁通量。

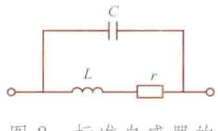


图 2 标准自感器的等值电路

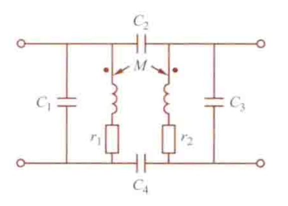


图 3 标准互感器的等值电路

标准电感器的分布电容等寄生参数会使电感量随频率而变，所以其工作频率应尽量与检定时的频率一致。

使用标准电感器时应注意使其工作电流不超过允许值。标准电感器应与周围的铁磁和金属物体保持较远距离，并避免杂散磁场的影响。对寄生耦合引起的误差，可采用交换端钮接线的方法来消除。

标准电感箱由具有多个名义值的标准电感器组合而成，通过切换开关，可得到十进制的可变标准电感值。

biaozhun dianneng biao

标准电能表 (standard kWhmeter; rotating standard) 校验普通电能表用的准确级别较高的电能表。分为感应系标准电能表和准确级别更高的静止式标准电能表。

感应系标准电能表 工作原理与普通感应系电能表相同。它的计数机构为三位指针式（也有脉冲数显示的），指示铝圆盘转数从 0.01 转至 100 转（见图 1，图 2）。起动和停止机构有两种形式：一种是在铝圆盘连续转动情况下，利用电磁铁将计数机构与铝圆盘间的传动装置分离或连接，同时对计数机构制动；另一种是切断或接通电压线圈的电压，使铝圆盘停止或起动。计数机构设有复零装置，能使计数指示全部复零。感应系标准电能表制成多个规格，如电压为 110V 或 220V；电流为 1A、5A 及 10A 等；有单相、三相三线及三相四线的。

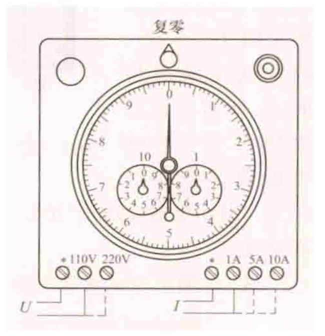


图 1 感应系标准电能表外形图



图 2 标准电能表

感应系标准电能表的准确级别为 0.5 级及 0.2 级。在电流为标定

值的20%～120%、$\cos\varphi=1$及电流为标定值的50%～120%、$\cos\varphi=0.5$（滞后）时，相对误差小于准确级指数的百分数。环境温度改变10℃、频率改变额定值的±5%、电压改变额定值的±10%时，误差改变小于准确级指数的百分数。感应系标准电能表在使用上需要预热，一般为30min。

静止式标准电能表 其准确度较高，已基本取代了感应系标准电能表。有多种原理和结构，归纳起来主要由四个基本功能单元组成，如图3框图所示，其中每个方框都有几种不同的实现原理和线路。

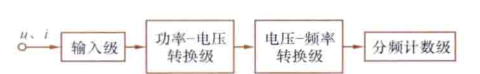


图3 静止式标准电能表原理框图

输入级 采用分压法或互感器法，将线路电压和负荷电流分别转换为成比例的低电压后，输送至下一级。

功率-电压转换级 采用乘法器将输入的两个参量转换为其乘积值（即功率），再把功率成正比地转换为电压后，送至下一级。乘法器有多种，常用的有时分割乘法器等。

电压-频率转换级 采用积分方式，将输入电压转换为成正比的频率后，再送至下一级。电压-频率转换的原理及线路有多种，如恒流反馈式电压-频率转换等。

分频计数级 采用分频器降低输入的脉冲频率，以便于计数，如2Hz、2kHz、6kHz等。计数器可采用数字计数器或机械式计数器。分频后设有单独的输出端钮，供自动校验用。

静止式标准电能表的准确级为0.1、0.05、0.02级及0.01级。在额定条件下，当电流为标定值的80%～120%，$\cos\varphi=1$、$\cos\varphi=0.5$（滞后）及$\cos\varphi=0.8$（超前）时，相对误差均小于准确级指数的百分数。当线路电压改变额定值的±10%、频率改变额定值的±5%时，误差改变均小于准确级指数百分数的30%。当环境温度改变10℃，误差改变小于准确级指数的百分数。



图4 SZ-01A-K3单相多功能标准电能表

图4～图7所示为单相和三相多功能标准电能表。



图5 SZ-03A-K6三相多功能标准电能表



图6 TD3300三相多功能标准电能表



图7 YCMT-1003便携式三相多功能标准电能表

biaozhun dianrongqi

标准电容器 （standard capacitor） 保存和传递电容单位法拉量值的标准量具。用于在交流测量中作电容标准量具，或安装在电测量仪器中作为精密电容元器件。

标准电容器的量值通常是十进制的，其电容量值范围一般从1pF到1μF，特殊情况下也可制成更小或更大数值，或非十进制数值。

作为计量标准用的标准电容器，按其在量值传递系统中的位置分为计量基准、计量标准及一般工作标准量具三挡，较低挡标准电容器的量值由较高挡的传递。图1所示为电容工作基准。



图1 电容工作基准装置

标准电容器按准确度分级。中国的标准电容器从0.01～0.2级共分5个级别。标准电容器的电容量值与其所采用的电极结构和电介质有关。10pF以下的小容量标准电容器常采用同轴圆柱形电极结构和密封的空气，其优点是稳定性好，但电容量不易做大。100～1000pF的标准电容器常采用多层平板型电极结构并以空气作电介质。大于1000pF的标准电容器如仍采用平板型空气结构，则相当笨重，因而常采用云母镀银工艺制作，其中，银作电极，云母为电介质。10～100μF标准电容器常采用表面金属化的有机绝缘薄膜制作，以减小体积。100μF以上标准电容器不易制作，常采用带有耦合变压器或运算放大器的等效大电容方式获得，其等效电容量可高达1F以上。

电容器内的电介质在交变电场中会消耗一定能量，即电容器的容抗有损耗分量。此种分量可以用并联在电容上的电导G表示，如图2所示。比值$\frac{G}{\omega C}=\tan\delta$称为电容器的损耗因数。标准电容器的$\tan\delta$应接近于零。

标准电容箱由具有多个名义值的标准电容器组合形成，借助开关切换，可得到十进制的可变标准电容值。

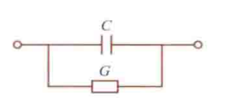


图2 标准电容器的并联等值电路

使用标准电容器时，应注意其工作电压不能超过允许值。对小容量标准电容器，要仔细考虑屏蔽防护措施，以去除各种寄生杂散电容的影响。在交流电路中使用大容量标准电容器时，应注意并设法减少引线带来的误差。

biaozhun dianzuqi

标准电阻器 （standard resistor） 保存和传递电阻单位欧姆量值的标准电阻量具或装置。其中，标准电阻量具常用于交、直流测量中作为标准电阻器，或安装在电测量仪器中作为精密电阻器件。

标准电阻器的量值通常是十进制的，其阻值范围从$1\times10^{-4}\Omega$到$1\times10^{12}\Omega$，特殊情况下也做成非十进制数值。图1所示为标准电阻器外观。

中国规定，按在量值传递系统中的位置，将标准电阻器

细分为国家电阻基准、国家电阻副基准、电阻工作基准、一等标准电阻器、二等标准电阻器及一般的标准电阻器。其中，借助量子化霍耳效应建立的中国国家直流电阻基准的电阻单位量值的复现准确度，比原有实物国家直流电阻基准高 2 个数量级。较低挡标准电阻的量值由较高挡的传递。


图 1　标准电阻外观图

实物标准电阻器　实物标准电阻器一般用温度系数低、稳定度高的锰铜合金丝（片）绕在黄铜或其他材料骨架上，再套上铜制外壳制成。外壳与骨架通常焊在一起，将电阻丝密封起来，以减少大气湿度、气压等因素的影响。实物标准电阻器绕成后，要经过退火处理，消除绕制过程中产生的机械应力，从而提高其量值的稳定性。实物标准电阻器的引线经密封的瓷绝缘子引出，与装在面板上的端钮相接。

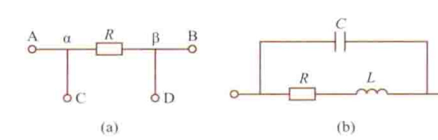


图 2　四端钮式标准电阻器及等值电路
(a) 四端钮式标准电阻器；(b) 等值电路

实物标准电阻器通常制成四端钮式，见图 2（a）。A、B 为电流端，C、D 为电位端；测量时应使电位端不流过电流，这样 C、D 两个端钮的电位就分别等于 α、β 两点的电位，从而消除了 Aα、Cα、Bβ、Dβ 四条引线的电阻以及端钮处接触电阻的影响。

为使用方便，实物标准电阻量具的准确度也常用级别表示。中国的实物标准电阻器从 0.000 05 级起至 0.2 级，共分为 12 个级别（0.000 05，0.000 1，0.000 2，0.000 5，0.001，0.002，0.005，0.01，0.02，0.05，0.1，0.2）。0.01 级标准电阻器的误差的绝对值不超过 0.01%。

在交流电路中使用的实物标准电阻器，除阻值外，还需考虑其自感 L 和分布电容 C，如图 2（b）所示。为减少自感，可采用双线绕法，但阻值超过 100kΩ 后，双线绕法会导致较大的分布电容，因而要改用分段绕法，以使自感和分布电容均较小。骨架常使用云母、瓷等优质绝缘材料，以进一步减少分布电容及介质损耗。

标准电阻箱（见图 3）是由多个名义值的实物标准电阻器件组合形成的，它经开关切换，可得到十进制的可变标准电阻值。


图 3　开关式直流精密电阻箱

使用实物标准电阻器时，要避免机械冲击和剧烈的温度变化；且使其耗散的功率一般应小于 0.1W，以保证其阻值稳定。

量子化霍耳电阻　1980 年德国科学家 K. 克里青（K. Klitzing）发现了量子化霍耳效应。为实现它，先要获得二维电子气，即电子被约束在二维平面上运动。二维电子气中的电子在强磁场中的能量本征值表示为$E=(i+0.5)\times h'\times \omega_c$；其中，$\omega_c$是电子在磁场中的回转角频率；$h'=h/(2\pi)$，$h$ 是普朗克常数；i 为霍耳效应平台的阶数。可见，电子能级是分立的，相邻两电子能级间均相差 $h'\times\omega_c$。通过实验，可用半导体 GaAs-Al$_x$Ga$_{1-x}$As 异质结构使电子被约束在二维平面上运动，在磁通密度达 10T 量级和约 1K 低温下，电子气被局限在异质结构的界面区，且达到完全量子化。

当恒定电流 I 沿该界面流过时，在正交于电流方向生成的电压被称为霍耳电压 U_H。对于固定的电流，霍耳电压与磁通密度的关系曲线上将出现一系列 U_H 保持不同恒定值的平台。这些平台的霍耳电阻 $R_{H(i)}$ 是量子化的，称为量子化霍耳电阻，其量值为

$$R_{H(i)}=U_H/I=h/(ie^2)=R_K/i$$

式中 e 为基本电荷量；R_K 是克里青常数。可见，在平台处，量子化霍耳电阻仅与 h、e 和 i 有关，而与半导体材料、温度等宏观因素无关。因此，用霍耳电阻复现电阻的单位就十分理想，它也被作为一种自然的电阻标准。1990 年，国际计量委员会批准在全世界范围内启用 $i=2$ 的霍耳平台的电阻值，即

$$R_{H(2)}=h/(2e^2)=12\,906.403\,5\Omega$$

作为量子化霍耳电阻的国际推荐值。国际计量局、德国、英国、瑞士、日本、加拿大、美国和中国已建立了量子电阻基准。其中，中国的量子化霍耳直流电阻国家基准（见图 4）的不确定度仅 2×10^{-10}（包含因子 $k=1$）。


图 4　量子化霍耳电阻国家基准

biaogefa

表格法　（tableau analysis）　用电路中全部支路电流、支路电压和一组辅助变量作为待求量以求解电路问题的方法。这组辅助变量通常采用节点电压（也可用树支电压或连支电流）。设连通电路中支路数为 b，节点数为 n，则未知量数和列写方程式数均为 $2b+n-1$。这种方法宜用于计算机求解电路，方程数虽较之节点电压法、回路电流法多但列写的规则简单，且方程的系数矩阵中零元素较多，可应用稀疏矩阵算法求解联立方程。

图示为一含理想变压器的正弦交流电路，支路数 $b=6$，节点数 $n=3$，支路电流有 $\underline{I}_1$、$\underline{I}_2$、$\underline{I}_3$、$\underline{I}_4$、$\underline{I}_5$、$\underline{I}_6$，支路电压有 $\underline{U}_1$、$\underline{U}_2$、$\underline{U}_3$、$\underline{U}_4$、$\underline{U}_5$、$\underline{U}_6$，加上节点电压 $\underline{V}_1$、$\underline{V}_2$ 共 $2b+n-1=14$ 个待求量。由基尔霍夫第一定律，得

$$\underline{I}_1+\underline{I}_3+\underline{I}_5=0$$

$$\underline{I}_2+\underline{I}_4+\underline{I}_6=0$$

由基尔霍夫第二定律，得

$$\underline{U}_1-\underline{V}_1=0,\ \underline{U}_3-\underline{V}_1=0,\ \underline{U}_5-\underline{V}_1=0$$

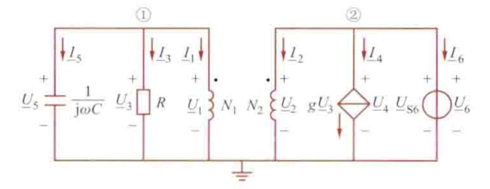
$$\underline{U}_2-\underline{V}_2=0,\ \underline{U}_4-\underline{V}_2=0,\ \underline{U}_6-\underline{V}_2=0$$

由支路约束，得

$$N_2\underline{U}_1 - N_1\underline{U}_2 = 0,\ N_1\underline{I}_1 + N_2\underline{I}_2 = 0,$$

$$\underline{U}_3 - R\underline{I}_3 = 0$$

$$\underline{I}_4 - g\underline{U}_3 = 0,\ \underline{U}_5 - \frac{1}{\mathrm{j}\omega C}\underline{I}_5 = 0,\ \underline{U}_6 = \underline{U}_{S6}$$



含有理想变压器的正弦交流电源

其中 N_1、N_2 分别为变压器一次侧、二次侧的匝数；R、g、C 为电路参数。上述联立方程，可用矩阵形式表示为

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_2 & -N_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\mathrm{j}\omega C} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{W}} \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \\ \underline{U}_6 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{I}_5 \\ \underline{I}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \underline{U}_{S6} \end{bmatrix}$$

系数矩阵 $\boldsymbol{W}$ 中有 196 个元素，零元素占 167 个，$\boldsymbol{W}$ 是稀疏矩阵。由网络图论可知，上述方程可系统化表示为

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A} \\ -\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{1} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M} & \boldsymbol{N} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{W}} \begin{bmatrix} \underline{\boldsymbol{V}} \\ \underline{\boldsymbol{U}} \\ \underline{\boldsymbol{I}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \underline{\boldsymbol{U}}_S \end{bmatrix}$$

系数矩阵 $\boldsymbol{W}$ 中的子矩阵 $\boldsymbol{A}$ 即电路的关联矩阵（见网络图论）。列写系数矩阵 $\boldsymbol{W}$ 的规则很简单，相当于填写一张表格，易于用计算机来完成。而且这一方法通用性强，因此，随着计算机的广泛应用，在求解大规模电路中这一方法日益受到重视。

biaojiegou

表结构　(lists)

由数据元素组成的序列所构成的一种数据结构，简称为表。其元素可以是结构较简单的数据，也可以是表结构的数据（子表）。构成表的元素可以是该表本身，因此表结构是递归定义的。表结构应用广泛，用于人工智能等领域的表处理语言（LISP），把表作为它的基本数据结构，就连用它编写的程序也表示为一系列的表。

由于表中的数据元素可以不同构（单元素或子表），故可以构成各种各样的表。包括：①多层次结构的表：表的元素是子表，子表的元素还可以是子表；②共享表：一个表可以同时是其他若干个表的元素；③递归表：一个表为其本身的一个元素。对于元素不同构的表，通常采用链式存储结构。

在程序设计中，最常用的表结构有线性表、字符串和数组。

线性表　同一数据类型的单元素组成的表。此时每一元素可对应一个序号。对线性表的基本操作有：存取某一序号的元素，在两个相邻元素之间（也包括在表头或表尾）插入一个元素，删除某一元素等。无插入删除操作的表称为静态表，可采用顺序存储结构表示。有插入和删除操作的表称为动态表，可采用链式存储结构或顺序存储结构。根据插入和删除方式不同，动态线性表又分为：①栈：只能在表的同一端进行插入和删除的线性表；②队列：只能在表的一端进行插入，而在表的另一端进行删除的线性表；③一般的动态线性表：允许在表的任意位置进行插入和删除。

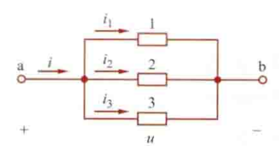
字符串　以字符作为元素的表，即字符序列。它是计算机非数值处理的基本对象。字符串中字符的个数称为串的长度，字符串中任意个连续的字符组成的子序列称为该串的子串。对字符串的基本操作有：取子串，子串的替换、插入和删除，两个子串的连接和比较等。字符串的顺序存储结构有紧缩格式和非紧缩格式两类。字符串的链式存储结构，存在一个“结点大小”的问题，即每个结点可以存放一个字符，也可以存放多个字符。

数组　由同一类型的线性表（其元素的数据类型和个数均相同）组成的多层次表。数组结构的层次称为数组的维数。线性表是一维数组，以线性表为元素的一维数组是二维数组……。矩阵是二维数组。由于数组一般不进行插入和删除操作，因此通常采用顺序存储结构表示。

binglian

并联　(parallel connection)

将两个或两个以上二端电路元件中每个元件的两个端子，分别接到一对公共节点上的连接方式。图示为三个二端元件并联。它们都接到一对公共节点 a、b 之上。节点 a、b 则分别与电路的其他部分连接。



三个元件并联

并联电路的特点　主要有：①所有并联元件的端电压是同一个电压。②并联电路的总电流是所有元件的电流之和。图示电路中，i 是总电流，i_1、i_2、i_3 分别是流经元件 1、2、3 的电流，$i=i_1+i_2+i_3$。③若干个电阻并联时，并联电路的总电导是各并联电阻的电导之和；总电阻的倒数是各电阻的倒数之和。设图中三个电阻分别是 R_1、R_2、R_3，它们的电导分别是 G_1、G_2、G_3。则并联电路的总电阻 R 和总电导 G 按下面的公式计算

$$1/R=1/R_1+1/R_2+1/R_3\ ,\ G=G_1+G_2+G_3$$

实例　民用照明灯泡都是并联接到 220V 额定电压的

电源上，因此每只灯泡所承受的电压均为220V，而外电路的总电流则是流过所有灯泡的电流之和。

bingxing chuli jisuanji xitong

并行处理计算机系统 (parallel processing computer system) 见高性能计算。

Bobofu wending panju

波波夫稳定判据 (Popov stability criterion) 在频率域内，由系统的线性部分的频率特性直接分析非线性单变量系统稳定性的判据。使用这样的判据分析非线性系统稳定性的方法称为波波夫法，它仅适用于能将系统中的非线性和线性部分分开的非线性系统。

设非线性系统如图1所示。系统中非线性特性 $y=f(x)$ 可具有任意形式，但必须满足下列条件

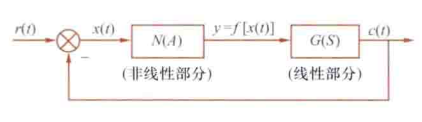


图1 非线性系统

$$\begin{cases} f(x)=0 & x=0 \\ k_1 \leqslant \dfrac{f(x)}{x} \leqslant k_2 & x \neq 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中 x 为非线性部分的输入；$f(x)$ 为非线性部分的输出；k_1、k_2 为将非线性特性 $f(x)$ 夹在中间的两条直线的斜率，k_2 可为任意正值或无穷大，要求 $k_1 \geqslant 0$。

设非线性系统中线性部分的全部极点具有负实部，其频率特性为 $G(j\omega)$，再令

$$G^*(j\omega)=X(\omega)+jY(\omega) \tag{2}$$

式中

$$\begin{cases} X(\omega)=\mathrm{Re}G(j\omega) \\ Y(\omega)=\omega \mathrm{Im}G(j\omega) \end{cases} \tag{3}$$

则作为波波夫稳定判据的非线性控制系统大范围渐近稳定的充分条件为

$$X(\omega)-qY(\omega)+\frac{1}{k_2}>0, \omega \geqslant 0 \tag{4}$$

式中 q 为某有限数。

如果令

$$X(\omega)-qY(\omega)+\frac{1}{k_2}=0 \tag{5}$$

则式(5)代表一条在 $G^*(j\omega)$ 平面上通过点 $(-1/k_2, j0)$，斜率为 $1/q$ 的直线，称此线为波波夫直线，如图2中的直线(1)。

波波夫稳定判据第一法　若系统的 $G^*(j\omega)$ 轨迹线，对于所有 $\omega \geqslant 0$，均位于波波夫直线右侧，则此非线性系统为大范围渐近稳定的。

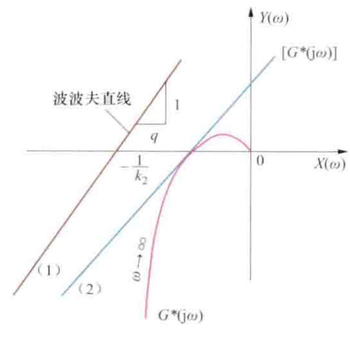


图2 波波夫稳定判据图解之一

通过 $G^*(j\omega)$ 轨迹线和负实轴的交点作与 $G^*(j\omega)$ 的切线，如图2中直线(2)。如果整个 $G^*(j\omega)$ 轨迹线位于此切线右侧，则由此切线表示的波波夫直线将给出保证系统大范围渐近稳定时的最大 k_2 值。

由于 $G^*(j\omega)$ 轨迹线的形状不同，q 的数值可以为 $q>0$，或 $q<0$，或 $q=0$。

如果非线性系统中线性部分的极点中有一个为零，其他极点都具有负实部，则为使该系统大范围渐近稳定，除应满足式(1)和式(4)外，还应满足

$$\mathrm{res}G(s)\mid_{s=0}>0 \tag{6}$$

式中 $\mathrm{res}G(s)\mid_{s=0}$ 为 $G(s)$ 在 $s=0$ 处的留数。

波波夫稳定判据第二法　如果非线性系统线性部分的 $G(j\omega)$ 轨迹线在复平面上不包围下面定义的圆，也不和圆相交，则非线性系统是大范围渐近稳定的。圆的方程为

$$\left(X+\frac{k_1+k_2}{2k_1k_2}\right)^2+Y^2=\left(\frac{k_2+k_1}{2k_1k_2}\right)^2 \tag{7}$$

式中 X、Y 分别为 $G(j\omega)$ 平面实轴和虚轴上的变量。

如果非线性特性的 $k_1=0$，则上述圆的圆心坐标和圆的半径都将趋向无穷大。这样，圆的方程将变为通过点 $(-1/k_2, j0)$、斜率为 $1/q=\infty$ 的直线方程，即

$$X(\omega)+\frac{1}{k_2}=0 \tag{8}$$

此时，波波夫直线便是通过点 $(-1/k_2, j0)$、斜率 $1/q=\infty$ 的直线，如图3所示。

图中，$G_1(j\omega)$ 曲线(1)对应于系统是大范围渐近稳定的，$G_2(j\omega)$ 曲线(2)对应于系统是不稳定的。

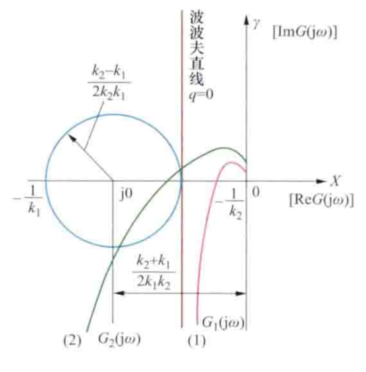


图3 波波夫稳定判据图解之二

波波夫法与其他方法的比较　①适用范围有限制[如式(1)所示]；②可以应用于高阶系统，这点要比相平面法优越；③是一个准确判定稳定性的方法，这点比描述函数法优越；④具有类似使用奈奎斯特稳定判据的方法的优点，很适合工程应用。只是，奈奎斯特稳定判据是充分必要条件，而波波夫稳定判据是充分条件。

boxing yinshu

波形因数 (waveform factor) 周期量的有效值与平均值之比。这里的平均值是指周期量绝对值的平均值(见平均值)。例如铁芯线圈(或变压器绕组)的电压有效值 U 和铁芯磁通最大值 Φ_m 的关系式为

$$U=4kfN\Phi_m$$

式中 k、f 和 N 分别为电压的波形因数、频率和线圈匝数。在电压为正弦波形的情况下，电压的波形因数 $k=\dfrac{\pi}{2\sqrt{2}}\approx 1.11$。从而 $U=4.44fN\Phi_m$，它是电机工程的常用公式之一。

用附有全波整流器的磁电系交流电流表测量正弦电流时，电流表所测量的电流是该电流的平均值 $\bar{I}$，但表盘刻度通常为该电流的有效值 I。在表针指示有效值 $I=1A$ 时，实质上电流表测出的是电流平均值 $\bar{I}=I/k\approx 1/1.11\approx 0.9A$。用这种电流表测量非正弦电流时，由于非正弦电流的波形因数不是1.11，表计的读数需要根据波形因数加以修正后才

能得到正确的电流有效值。

boli

玻璃 (glass) 一种质地硬而脆的无机透明材料。一般玻璃是由含石英的砂子、石灰石、纯碱等混合后，在高温下熔化、成型，冷却后制成。主要成分是二氧化硅、氧化钠和氧化钙。用作电气绝缘的玻璃，最常见的是以二氧化硅为主体加入氧化硼、氧化铝、氧化铅、氧化钙、氧化钠等氧化物组分，经混合熔制成高黏性液体，在使其不析出结晶的条件下急冷凝固而成。玻璃具有良好的电气绝缘性能、耐热性、化学稳定性和易加工成型性，在电气绝缘技术中获得了广泛的应用。常用的绝缘玻璃有石英玻璃、钠玻璃、铅玻璃、硼硅酸玻璃、易熔玻璃和玻璃纤维等。

石英玻璃 由纯石英在1700～1800℃下熔制而成，具有良好的电气绝缘性能、低的热膨胀系数、高的耐热性和耐热冲击性、良好的紫外线透射能力。常用作高频绝缘、高温绝缘。石英玻璃也用于制作光导纤维，供光缆线芯用。

钠玻璃 由二氧化硅和氧化钠等在1400℃左右熔制而成。由于其中含有碱金属离子，与石英玻璃相比，它的体积电阻率、表面电阻率和化学稳定性均有所下降，但钠玻璃的膨胀系数大，经过淬火处理后能使其机械强度和热稳定性大大提高，适于制作高、低压输配电线路的绝缘子。

铅玻璃 主要由二氧化硅和氧化铅等组成，其电气绝缘性能好、电容率高，常用作电容器介质。铅玻璃对射线有强的吸收能力，可用作隔离X射线和γ射线的防护材料。

硼硅酸盐玻璃 主要由二氧化硅和氧化硼等组成。具有高的绝缘电阻、低的高频损耗，良好的耐热冲击性和化学稳定性，常用作高频绝缘子。

易熔玻璃 主要由氧化硼、氧化铅、氧化硅、氧化锌等组成，其特点是熔化温度低，在电子产品中用作焊料和封装材料。

玻璃纤维 由熔制玻璃拉制成的纤维。电工上用的玻璃纤维多由低碱或无碱玻璃制成。与天然纤维相比，它具有不可燃性、高的化学稳定性、低吸潮性和机械强度大等特点，广泛用作耐热电磁线、变压器绕组等的绝缘材料。玻璃纤维及其编织物常作为补强材料用于制造电工复合制品，如由环氧树脂与玻璃纤维复合可制成高强度玻璃钢。玻璃纤维还广泛用作光纤通信。

Bode tu

伯德图 (Bode diagram) 表示控制系统正弦传递函数 $G(j\omega)$ 的对数幅频曲线和相频曲线的图形。伯德图由两张图组成：①$G(j\omega)$ 的幅值（以分贝，dB表示）-频率（以对数标度）对数坐标图，其上画有对数幅频曲线；②$G(j\omega)$的相角-频率（以对数标度）对数坐标图，其上画有相频曲线。所以伯德图又称为对数坐标图。伯德图用于控制系统的分析和设计。

频率特性可以写成一般的形式

$$G(j\omega)=K(1+j\omega T_1)(1+j\omega T_2)^r\cdots \Big/\left\{(j\omega)^\lambda(1+j\omega T_a)\left[1+\left(\frac{2\xi}{\omega_n}\right)j\omega+\frac{1}{\omega_n^2}(j\omega)^2\right]\cdots\right\}$$

式中 K 为增益（放大系数），ω_n 为无阻尼自然频率，ζ 为阻尼比。

频率特性的对数幅值（使用记号Lm）表达式为

$$\begin{aligned}\mathrm{Lm}G(j\omega)=&\mathrm{Lm}K+\mathrm{Lm}(1+j\omega T_1)+r\mathrm{Lm}(1+j\omega T_2)+\cdots\\&-\lambda\mathrm{Lm}j\omega-\mathrm{Lm}(1+j\omega T_a)\\&-\mathrm{Lm}\left[1+\frac{2\xi}{\omega_n}j\omega+\frac{1}{\omega_n^2}(j\omega)^2\right]-\cdots\end{aligned}$$

频率特性的相角表达式为

$$\begin{aligned}\varphi=&\angle G(j\omega)=\angle K+\angle 1+j\omega T_1+r\angle 1+j\omega T_2+\cdots\\&-\lambda\angle j\omega-\angle 1+j\omega T_a-\angle\left(1+\frac{2\zeta}{\omega_n}j\omega+\frac{1}{\omega_n^2}(j\omega)^2\right)-\cdots\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}\varphi=&\angle G(j\omega)=0^\circ+\arctan\omega T_1+r\arctan\omega T_2\\&+\cdots-\lambda 90^\circ-\arctan\omega T_a\\&-\arctan\frac{2\xi\omega/\omega_n}{1-\omega^2/\omega_n^2}-\cdots\end{aligned}$$

对数幅值的数量关系为

$$\mathrm{Lm}G(j\omega)=20\lg|G(j\omega)|,\mathrm{dB}$$

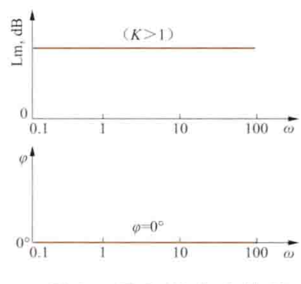
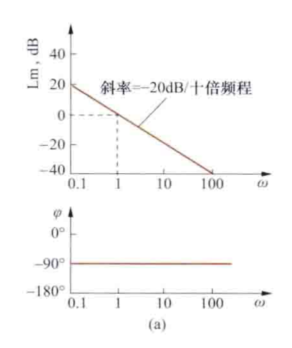


图1 因子 K 的伯德图

作伯德图时，首先写出频率特性，然后按常数因子 K、积分和微分因子 $(j\omega)^{\mp1}$、一阶因子 $(1+j\omega T)^{\mp1}$ 和二阶因子 $[1+2\zeta(j\omega/\omega_n)+(j\omega)^2/\omega_n^2]^{\mp1}$ 这四种基本因子分别画出伯德图，再总加而成。图1～图5所示为上述基本因子的伯德图。



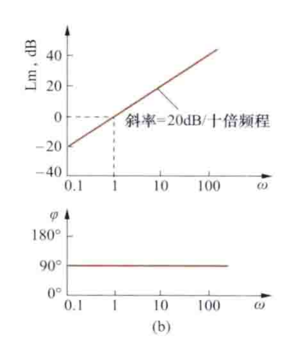


图2 因子 $(j\omega)^{\mp1}$ 的伯德图

(a) $(j\omega)^{-1}$ 因子；(b) $(j\omega)$ 因子

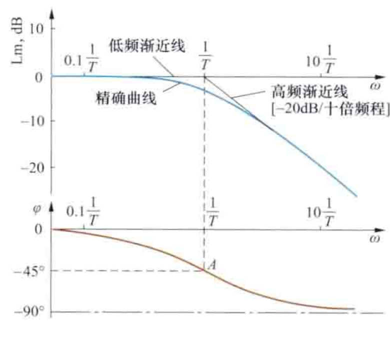


图3 因子 $(1+j\omega T)^{-1}$ 的伯德图

采用对数坐标图的主要优点：①可以把幅值的乘除运算转化为加减运算；②可以采用简便的方法快速绘制近似的对数幅频曲线；③频率采用对数分度便于扩展低频段，而低频特性在实际系统中是重要的；④若将实验获得的频率响应数据绘制在对数坐标图上，能写出传递函数表达式。

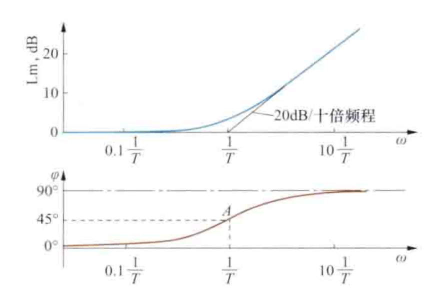


图 4 因子（$1+j\omega T$）的伯德图

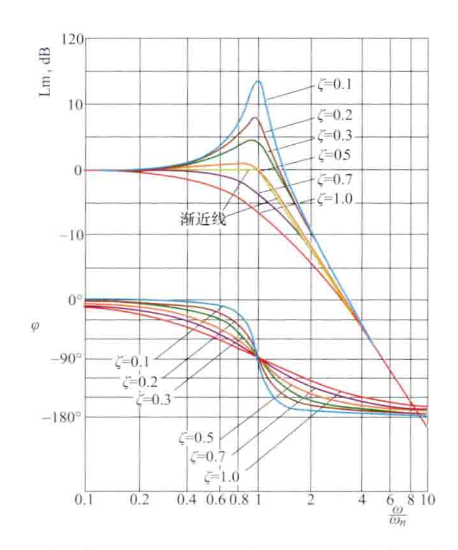


图 5 因子$[1+2\zeta(j\omega/\omega_n)+(j\omega)^2/\omega_n^2]^{-1}$的伯德图

baomo dianzu cailiao

薄膜电阻材料 （materials for film resistor） 用于制造薄膜电阻的材料。电子技术中广泛应用薄膜电阻材料来制造分立电阻元件及集成电路中的电阻元件。薄膜电阻材料分为两类：碳膜和金属膜。早期大量使用碳膜电阻，但由于工艺上的原因，碳膜电阻的容许误差高达±10%以上，而且温度系数大，因此在要求高的场合普遍使用金属膜电阻。当金属的厚度小于电子在金属中的平均自由程时，电阻率急剧增加。利用这一效应可制成体积很小而阻值很高的金属膜电阻。其阻值误差可控制在±(2.5～5)%内，而且电阻温度系数远小于碳膜电阻。金属膜电阻的时间稳定性较好，体积比相同功率的碳膜电阻小得多。薄膜电阻一般成膜于陶瓷或玻璃基体上。碳膜还可以成膜于绝缘纸板上。金属成膜可采用蒸镀法、阴极溅射法、还原法和氧化物烧结法。常用的金属膜材料有镍铬合金（Ni－Cr）、氮化钽（TaN）、铬氧化硅合金（Cr－SiO）、氧化锡（SnO_2）等。其中Cr－SiO用于制造1MΩ以上的高值电阻。金属膜电阻的温度系数大致是10^{-4}℃$^{-1}$量级，有正温度系数和负温度系数两类。碳膜电阻具有负的温度系数，数值是10^{-3}℃$^{-1}$量级，其时间稳定性比金属膜电阻差得多。

buduichen sanxiang dianlu

不对称三相电路 （unsymmetrical three-phase circuit） 三相电源电压不对称或三相负载不对称的电路。这种电路中的三相电流一般是不对称的。

三相电源不对称情况 通常情况下，三相电源的电压是对称或接近对称的（见对称三相电路）。电源侧出现故障时，使三相电压不对称。图1所示为电源侧A相断线的故障，负载是三角形接线。

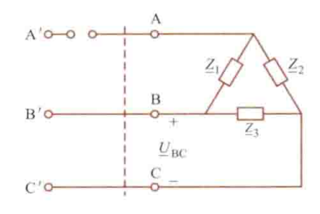


图 1 A相断线时的三相电路

此时，线电压$\underline{U}_{BC}$实际上是单相电压。阻抗$\underline{Z}_3$直接接于该单相电压上，阻抗$\underline{Z}_1$和$\underline{Z}_2$串联后接于该电压上。三相负载不能正常工作。

三相负载不对称情况 许多不对称负载是单相负载，例如电力机车、电灯、电冰箱等。从电力系统运行观点看，总是希望负载尽可能对称。为此，要把单相负载尽可能均匀地接于各相电压上。图2中的两个单相负载代表两台电力机车。上行机车接在电压$\underline{U}_{AB}$上，下行机车接在电压$\underline{U}_{BC}$上，而不是把它们接在同一个电压上。居民用电一般为低压三相四线制，也应尽可能将各住宅的负载均匀地分配到三个相电压上。

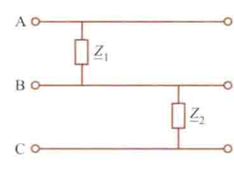


图 2 接在三相电压上的两个单相负载

不对称三相电路计算 有两种计算方法：对称分量法和用通常分析正弦电流电路的方法如节点法等。下面以图3所示不对称三相电路为例说明后一种计算方法。图3电路是有中线的不对称星形电源向不对称星形负载供电的三相四线制电路。负载中性点N′与电源中性点N之间的电压相量$\underline{U}_{N'N}$按下式计算

$$\underline{U}_{N'N}=\frac{\underline{Y}_A\underline{U}_{SA}+\underline{Y}_B\underline{U}_{SB}+\underline{Y}_C\underline{U}_{SC}}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C+\underline{Y}_N}$$

式中$\underline{Y}_A=1/(\underline{Z}_{1A}+\underline{Z}_A)$；$\underline{Y}_B=1/(\underline{Z}_{1B}+\underline{Z}_B)$；$\underline{Y}_C=1/(\underline{Z}_{1C}+\underline{Z}_C)$；$\underline{Y}_N=1/\underline{Z}_N$。其中$\underline{Z}_{1A}$、$\underline{Z}_{1B}$、$\underline{Z}_{1C}$分别为A相、B相和C相端线的阻抗；$\underline{Z}_A$、$\underline{Z}_B$、$\underline{Z}_C$分别为A相、B相和C相的负载阻抗，$\underline{Z}_N$为中线阻抗；$\underline{U}_{SA}$、$\underline{U}_{SB}$、$\underline{U}_{SC}$分别为三相电源的A相、B相和C相的相电压相量。线电流相量$\underline{I}_A$、$\underline{I}_B$、$\underline{I}_C$按下式计算

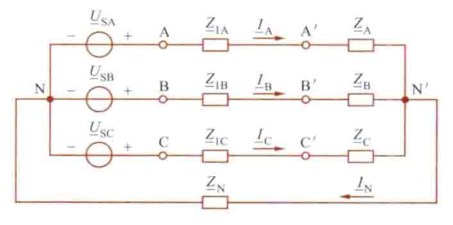


图 3 具有中线的不对称星形电源和不对称星形负载的三相电路

$$\underline{I}_A=\underline{Y}_A(\underline{U}_{SA}-\underline{U}_{N'N})$$
$$\underline{I}_B=\underline{Y}_B(\underline{U}_{SB}-\underline{U}_{N'N})$$
$$\underline{I}_C=\underline{Y}_C(\underline{U}_{SC}-\underline{U}_{N'N})$$

负载相电压相量$\underline{U}_{A'N'}$、$\underline{U}_{B'N'}$、$\underline{U}_{C'N'}$和负载线电压相量$\underline{U}_{A'B'}$、$\underline{U}_{B'C'}$、$\underline{U}_{C'A'}$按下式计算

$$\underline{U}_{A'N'}=\underline{Z}_A\underline{I}_A,\ \underline{U}_{A'B'}=\underline{U}_{A'N'}-\underline{U}_{B'N'}$$
$$\underline{U}_{B'N'}=\underline{Z}_B\underline{I}_B,\ \underline{U}_{B'C'}=\underline{U}_{B'N'}-\underline{U}_{C'N'}$$
$$\underline{U}_{C'N'}=\underline{Z}_C\underline{I}_C,\ \underline{U}_{C'A'}=\underline{U}_{C'N'}-\underline{U}_{A'N'}$$

对称电源不对称负载下的负载中性点位移　通常，相电压相量$\underline{U}_{AN}$、$\underline{U}_{BN}$和$\underline{U}_{CN}$的末端分别是等边三角形顶点A、B和C，它们的始端则在该三角形的重心N处，见图4，这个图称为位形图。如果电压相量$\underline{U}_{N'N}\neq0$，在位形图上，对应于负载中性点的N′将随三相负载和端线的不对称程度而偏离N点，甚至N′点可能落在三角形ABC的外部。这种现象称为负载中性点位移。设电源侧线电压$U_{AB}=380V$，则相电压为220V。在图4所示情况下，A相负载$\underline{Z}_A$上的电压$U_{AN'}<U_{AN}$，即$U_{AN'}<220V$，而$\underline{Z}_B$（B相负载）上的电压$U_{BN'}>220V$，C相负载$\underline{Z}_C$上的电压$U_{CN'}>220V$。若中性点N′位移很大，负载将不能正常工作。要避免负载中性点N′位移，应使$\underline{U}_{N'N}=\underline{Z}_N\underline{I}_N$接近于零，即中线阻抗$\underline{Z}_N$应尽量小。这样即使负载不对称，也能保证各相负载的电压近似等于220V。

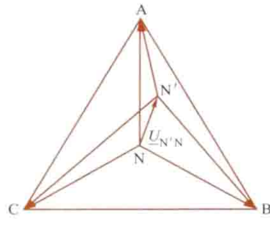


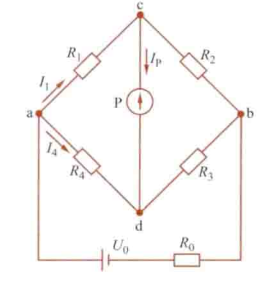
图4　电压位形图

bupingheng dianqiao

不平衡电桥 (unbalance bridge)

利用不平衡状态实现电阻小变化量测量的电桥。电工测量实践中，有时并非利用电桥的平衡状态，而是根据电桥线路指示仪表的非零指示值来确定测量结果。

不平衡电桥在非电量的电测量方面应用广泛。测量温度变送器电阻的变化；对测直线尺寸用变送器的电感或电容变化量的测量，等等。测量线路的平衡状态对应于被测对象的某一中间值或初始值（对应于变送器的某一输出量）。被测对象的变化会引起测量线路中指示仪表指针的偏转。指示仪表的零点应位于标度尺的中间位置，指示仪表中电流的方向决定于桥臂电阻增量的符号。



直流单比电桥线路

图示直流单比电桥线路处于不平衡状态，即电流I_P不为零时，有

$$I_P=U_{cd}/(R_{cd}+R_P)\qquad(1)$$

式中U_{cd}为指示仪表P支路的开路电压；R_{cd}为从指示仪表P支路向电桥线路看的等效电阻；R_P为指示仪表内阻。

开路电压U_{cd}可表示为

$$U_{cd}=I_4R_4-I_1R_1=U_0(R_2R_4-R_1R_3)/[(R_1+R_2)(R_3+R_4)]\qquad(2)$$

在很多情况下可假设$R_0=0$。于是R_{cd}可简写为

$$R_{cd}=R_1R_2/(R_1+R_2)+R_3R_4/(R_3+R_4)\qquad(3)$$

将式（2）和式（3）代入式（1），有

$$I_P=U_0(R_2R_4-R_1R_3)/[R_P(R_1+R_2)(R_3+R_4)+R_d]\qquad(4)$$

式中$R_d=R_1R_2(R_3+R_4)+R_3R_4(R_1+R_2)$。

由式（4）可见，当电桥处在平衡状态即$R_2R_4-R_1R_3=0$时，$I_P=0$，这与直流单比电桥平衡式的结论是一致的。

设体现被测对象的未知电阻$R_x=R_4+\Delta R$，它替代图中的R_4，也可理解为电阻R_4的值发生改变，有一增量ΔR。考虑到$R_2R_4-R_1R_3=0$时电桥达到平衡，于是电桥的不平衡电流，即相对于电阻增量ΔR，指示仪表支路电流的增量可表示为

$$\Delta I_P=U_0R_2\Delta R/[R_P(R_1+R_2)(R_3+R_4)+R_d]\qquad(5)$$

这里略去了分母中含ΔR的项，即假定$\Delta R\ll R_4$，亦即意味着电桥接近于平衡状态。

由于式（5）中除ΔR以外的所有电阻以及U_0都是确定的，故指示仪表支路电流的增量即不平衡电桥的输出与被测对象的变化量之间的关系可近似表示为

$$\Delta I_P=f(\Delta R)\qquad(6)$$

对直流单比电桥线路，若某一桥臂电阻发生变化造成其偏离平衡，指示仪表将出现非零的指示。据式（5），指示仪表的示值与上述桥臂电阻的变化增量以及电源电压的乘积成正比。若对应于电桥平衡条件的各桥臂电阻的基值以及电源电压保持不变，则可认为电桥的不平衡电流与上述桥臂电阻变化增量的绝对值成正比。即只要存在这种关系，不必进行电桥平衡状态调节，也可得到较准确的测量结果——桥臂电阻值的增量可直接由不平衡电流的大小确定。但式（5）是在$\Delta R\ll R_4$下得到的，故用不平衡电桥对变化较大的被测对象实施测量，直接利用式（5）将导致很大误差。

Buer daishu

布尔代数 (boolean algebra)

一种含与、或、非运算且符合亨廷顿（E. V. Huntington）公理的代数系统。设S为有限集合，且其中含有两个特定的元素0和1，则由集合S、二元运算“与（$\wedge$）”、“或（$\vee$）”和一元运算“非（$\overline{\ }$）”构成的代数系统$B=\langle S,\wedge,\vee,\overline{\ },0,1\rangle$，如果满足下述的亨廷顿公理，则称$B$为布尔代数。

亨廷顿公理：①闭合律：对于任意的x，$y\in S$，有$x\wedge y\in S$，$x\vee y\in S$，$\bar{x}\in S$；②0－1律：对于任意的$x\in S$，$x\wedge1=x$，$x\vee0=x$；③交换律：对于任意的x，$y\in S$，$x\wedge y=y\wedge x$，$x\vee y=y\vee x$；④结合律：对于任意的x，y，$z\in S$，$x\wedge(y\wedge z)=(x\wedge y)\wedge z$，$x\vee(y\vee z)=(x\vee y)\vee z$；⑤分配律：对于任意的$x$，$y$，$z\in S$，有$x\wedge(y\vee z)=(x\wedge y)\vee(x\wedge z)$，$x\vee(y\wedge z)=(x\vee y)\wedge(x\vee z)$；⑥互补律：对于任意$x\in S$，有$\bar{x}\in S$，使$x\wedge\bar{x}=0$，$x\vee\bar{x}=1$。

若$B=\langle S,\wedge,\vee,\overline{\ },0,1\rangle$中$S=\{0,1\}$，则$B$称为二元布尔代数。此时“或”、“与”、“非”的运算规则定义为：$0\vee0=0$，$0\vee1=1$，$1\vee0=1$，$1\vee1=1$；$0\wedge0=0$，$0\wedge1=0$，$1\wedge0=0$，$1\wedge1=1$；$\bar{0}=1$，$\bar{1}=0$。

布尔代数得名于英国数学家G. 布尔（G. Boole）。他在著作《逻辑的数学分析》（1847年）和《思维规律的研究》（1854年）中建立了“布尔代数”原型，并创造了一套符号系统来表示逻辑中的各种概念，从而成功地将形式逻辑归结为一种代数演算。1936年，信息论创始人香农（C. Shannon）在其硕士论文中第一次提出了基于布尔代数来设计组合电路的方法，基本思路是：电路的操作由布尔函数来定义，布尔函数由基本的布尔逻辑运算规则来定义。经过一百多年的发展，布尔代数已成为开关理论和数字逻辑设计的重要数学工具。



C# yuyan

C#语言 （C#） 见程序设计语言。

C++ yuyan

C++语言 （C++） 见程序设计语言。

CMOS jicheng luojimen

CMOS 集成逻辑门 （complementary metal oxide semiconductor integrated logic gate） 利用 NMOS 管和 PMOS 管的互补特性，NMOS 和 PMOS 成对出现构成的集成逻辑门电路，又称 CMOS 集成门。

工作原理 一个 CMOS 反相器（非门）如图 1 所示，其中 V1 为 N 沟道增强型 MOS 管，V2 为 P 沟道增强型 MOS 管，两管的跨导相等。两管栅极连在一起作反相器输入端，漏极连在一起作反相器的输出端，源极 s2 接 $+U_{DD}$，s1 接地。要求电源电压 $U_{DD} > |U_{GS(th)P}| + U_{GS(th)N}$，其中 $U_{GS(th)P}$ 和 $U_{GS(th)N}$ 分别为 V2 和 V1 管的开启电压。

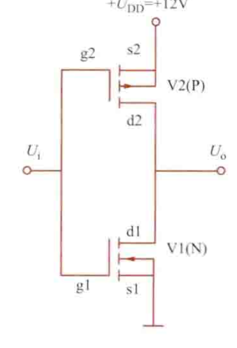


图 1 CMOS 反相器（非门）

当 U_i 为低电平时，NMOS 管 V1 截止，而 PMOS 管 V2 导通，电源电压主要降落在 V1 上，所以输出高电平 $U_{OH} \approx +U_{DD}$。

当 U_i 为高电平时，V1 管导通，而 V2 管截止，U_{DD} 主要降落在 V2 管上，所以输出低电平 $U_{OL} \approx 0V$。

由上述分析可知，图 1 的 CMOS 反相器有倒相功能，实现非逻辑。

图 2 为 CMOS 与非门电路，图中两个 P 沟道增强型 MOS 管并接，两个 N 沟道增强型 MOS 管串接。当输入量 A 和 B 取各种不同的逻辑值时，电路的输出 L 如表 1 所示，由表可见，该电路具有与非逻辑功能，$L = \overline{AB}$。

图 3 为 CMOS 或非门电路，图中两个 N 沟道增强型 MOS 管并接，两个 P 沟道增强型 MOS 管串接。当输入量 A 和 B 取各种不同的逻辑值时，电路的输出 L 如表 2 所示，由表可见，该电路具有或非逻辑功能，$L = \overline{A+B}$。

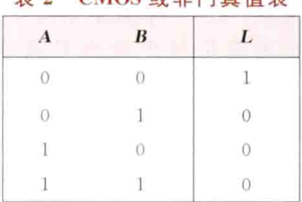
此外，CMOS 集成逻辑门还有与或非、异或门、三态门和传输门等。

电路结构特点 ①PMOS 管连接输出与电源（由于 PMOS 传输强逻辑 1），NMOS 管连接输出与地（由于 NMOS 传输强逻辑 0）。②NMOS 管串联，对应的互补 PMOS 管则并联，实现与非逻辑；NMOS 管并联，对应的互补 PMOS 管则串联，实现或非逻辑。

表 1 CMOS 与非门真值表

A	B	L
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

表 2 CMOS 或非门真值表



A	B	L
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

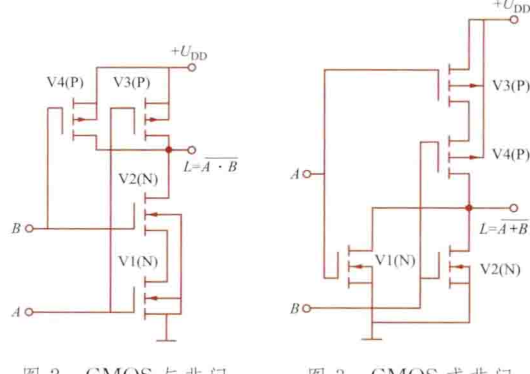


图 2 CMOS 与非门　　图 3 CMOS 或非门

优点 功耗低、扇出能力强、噪声容限大、电源电压范围宽等。随着 CMOS 制造工艺的改进，CMOS 器件在工作速度上也与 TTL 电路不相上下，成本和价格不断降低。因此，CMOS 集成逻辑器件在各个领域得到广泛应用。

COBOL yuyan

COBOL 语言 （COBOL） 见程序设计语言。

caiyang he xinhao zaixian

采样和信号再现 （sampling and signal reproduction） 连续信号经采样产生离散信号和离散信号近似地恢复为原连续信号。它用于采样控制系统的分析研究。

如图 1 所示，连续信号 $x(t)$ 经采样器采样后成为脉冲序列。采样器是以采样周期 T 重复开闭动作的采样开关。经采样开关输出的脉冲序列为采样信号 $x_s(t)$，τ 为采样持续时间。

当 τ 足够小时，采样信号 $x_s(t)$ 为连续信号 $x(t)$ 与单位冲激序列 $\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT)$ 的乘积，即 $x_s(t) = x(t)\delta_T(t)$。这种情况称为理想采样，是实际采样的理想化，用以简化采样过程的分析，而不影响本质。

为保证采样信号经适当处理后能再现原连续信号，采样周期的选取应符合采样定理。

连续信号 $x(t)$ 变换为频域函数 $X(f)$，其频谱如图 2（a）所示。理想采样信号的表达式为 $x_s(t) = x(t) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT)$，经傅里叶变换后化为频域函数为 $x_s(f) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f-nf_s)$。

若采样频率 $f_s=\frac{1}{T}$ 为 f_h 的两倍，则有图 2（b）所示的理想采样信号频谱，f_h 为连续信号中所含的最高次频率。在图 2（b）中，包含原连续信号频谱以及无限个经平移的原连续信号频谱。若使理想采样信号通过一截止频率为 f_h 和 $-f_h$ 的低通滤波器，则滤波后的频谱与原连续信号的频谱完全一致，即再现了原信号。采样频率 f_s 必须大于被采样的连续信号中所含最高次频率的两倍，这就是香农（Shannon）采样定理，它是保证采样信号再现成原信号的必要条件。

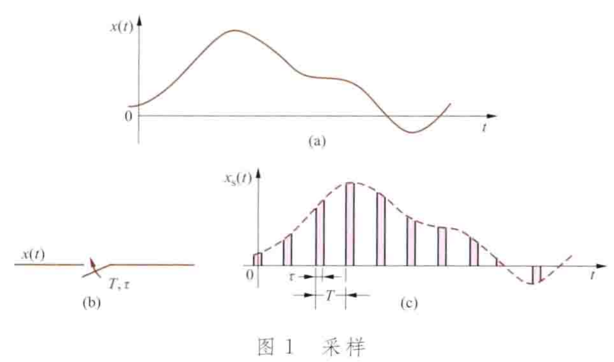


图 1 采样

（a）被采样的连续信号；（b）采样开关；（c）采样信号

若 $f_s<2f_h$，则产生频谱混叠，如图 2（c）所示，$-f_h$ 至 f_h 间对应于原连续信号频谱的高频分量和平移频谱的低频分量混叠在一起，经过低通滤波，也不能恢复原信号的频谱。必须避免这种情况的发生。

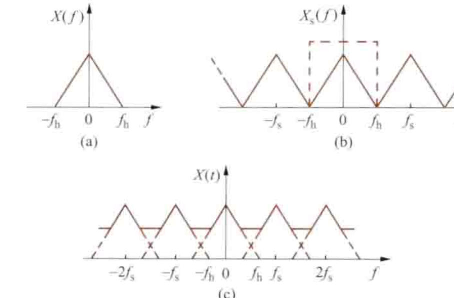


图 2 连续信号和采样信号频谱

（a）连续信号频谱；（b）采样信号频谱；（c）频谱混叠

低通滤波器的特性如图 2（b）中矩形虚线框所示，这是理想化了的，实际上无法做到准确的矩形。因此，f_s 刚刚大于 $2f_h$ 还不够，而是应该有相当的裕度，工程上一般取 $f_s=(4\sim6)f_h$。

canshu guji

参数估计（parameter estimation） 见估计理论和动态系统辨识。

caozuo chongji ganying naiya shiyan

操作冲击感应耐压试验（inductive withstanding test with switching impulse） 在电力变压器低压绕组施加操作冲击电压，通过电磁感应使变压器高压绕组的绝缘经受过电压考验的试验。试验所施加的电压波形是模拟电力系统内部由于开关操作或发生故障产生的一种波形，称为操作冲击电压波。根据中国电力行业标准的规定，操作冲击感应耐压试验可应用在变电站现场，对电力变压器进行绝缘考验。由于这种耐压方式省去了大容量的供电变压器，试验装备上可比采用三倍频试验装置施加正弦波电压更为方便。在电力变压器制造厂，对额定电压为 330kV 及以上电压等级的电力变压器应该进行操作冲击耐压试验。此时，也可采用感应耐压方式。

试验电压波形 对变压器类设备（包括互感器以及电抗器）的内绝缘所使用的标准操作冲击电压波形如图 1 所示。U_m 为电压峰值，T_1 为视在波前时间，T_2 为由视在原点起算到第一次过零的时间，T_3 为 90％峰值电压持续时间。规定 T_3 不小于 200μs；T_2 不小于 500μs；IEC 76—3 文件规定 T_1 不小于 20μs，通常不大于 250μs；中国国家标准规定 T_1 为 20～250μs；中国电力行业标准规定 T_1 不小于 20μs。上述波形与外绝缘耐压和放电所采用的波形有所区别。试验电压波的极性规定为负极性。试验电压峰值 U_m 由有关标准规定。施加的操作冲击电压的次数为 3 次。

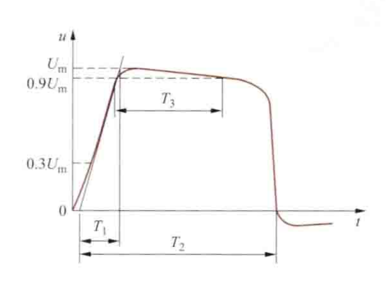


图 1 内绝缘试验用的标准操作冲击电压波形

原理接线 该试验的原理接线见图 2。由直流充电的电容 C_1，经一对铜球间隙 FA 放电，向变压器 T 低压侧施加一操作波。变压器高压侧因电磁感应，按变比升高电压产生试验用的操作波形。调节电阻 R_1、R_2 及电容 C_2 可调节变压器低压侧操作波至合适形状，其高压侧除初始阶段外，波形基本上与低压侧相同。过零时间 T_2 除与 C_1 电容量有关外，很大程度上取决于变压器非线性励磁电抗的大小，因此与铁芯的饱和程度、剩磁的大小及极性相关。

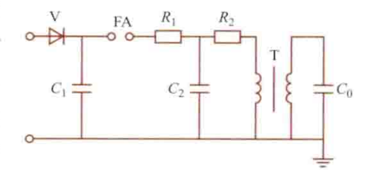


图 2 试验的原理接线

对于三相电力变压器，可采用自身励磁分相试验法。以试验额定电压为 110、220kV 变压器的 A 相绕组为例，可采用图 3 接线。低压侧 a—x 端口接到如图 2 左侧的操作波发生器上，高压侧用 B、C 两相绕组进行电位的“支撑”，以使 A 点达到一定的试验电压值。对于额定电压为 330kV 及以上的 Dy 接法的三相变压器，试验标准规定，星形绕组的中性点 O 在试验时直接接地，施压方法同图 3，接线见图 4。

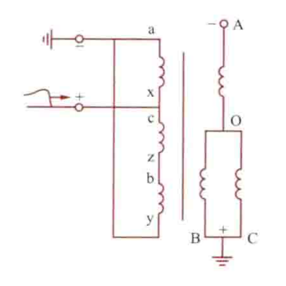


图 3 220kV 及以下三相变压器的试验接线

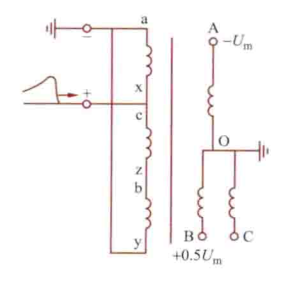


图 4 330kV 及以上三相变压器的试验接线

caozuo xitong

操作系统 (operating system, OS) 控制和管理计算机硬件和软件资源，合理组织计算机工作流程以及方便用户的程序的集合。操作系统所管理的资源分为四类，即处理机、存储器、外围设备和信息（程序和数据），因而相应地把操作系统分成：①处理机管理模块；②存储器管理模块；③设备管理模块；④文件管理模块。此外，为了合理地组织工作流程和方便用户，系统中还提供了作业管理模块，用于对作业进行控制和管理。作业是指用户程序及其所需的数据和命令的集合。

类型 有批处理系统、分时系统和实时系统。

批处理系统 用户将一批作业有序地输入到磁盘（磁带）上形成作业流。由计算机系统自动地依次把磁盘上的作业调入内存处理。为进一步改善资源的利用率，同时把几个程序 $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 调入内存分时共享中央处理器（CPU）。CPU 先对 P_1 进行处理。当它因某种原因（如 I/O 请求）不能运行时，CPU 便转去处理 P_2，使 P_1 的 I/O 操作和对 P_2 的处理并行，以此来减少处理机的空闲时间和提高系统的处理能力。这样便形成多道批处理系统，其特点是：磁盘中通常存有大量的后备作业，作业调度程序则依据一定的算法和原则，从后备作业中选择一批搭配合理的作业，调入内存运行。

分时系统 允许多个联机用户同时使用一台计算机进行处理的操作系统。该系统使处理机按时间片分时，控制每道程序一次只能运行一个时间片，并在指定的时间周期内每个用户都能运行一次，从而可使每个用户都能及时获得 CPU 的响应。响应时间是衡量分时系统性能的一个重要技术指标。分时系统的基本特征为：①多路性。亦即同时性，若干个用户同时使用计算机。②独立性。用户彼此独立操作，感觉像一人独占主机。③及时性。在规定的时间内获得响应。④交互性。用户可与系统进行人机对话。

实时系统 能及时响应外部事件请求，在规定时间内完成对事件的处理，并控制所有实时设备和实时任务协调一致地运行。实时系统具有同时性、独立性、及时性和交互性的特点。其交互性较弱，对及时性要求较高，对过载的防护能力及可靠性也有较高要求。实时系统分为实时控制系统和实时信息处理系统。

功能 操作系统具有存储器管理、进程管理、设备管理、文件管理和作业管理五大管理功能。

存储器管理 存储器管理的功能包括存储分配、存储保护、地址映射和存储扩充。①存储分配功能。合理分配内存空间，使各道程序不致因相互重叠而丢失信息。实现存储分配的方法有两类：一类是连续分配，把一个作业安置在一个连续的存储空间中。有单一连续分配、固定分区分配、可变分区分配、可重定位分区分配多种。另一类是不连续分配，把一个作业安置在若干不连续的存储空间内。有页式存储管理、段式存储管理和段页式存储管理。②存储保护功能。使各道作业在自己所属存储区内操作，防止某道程序异常而破坏其他程序。③地址映射功能。把地址空间中的逻辑地址转换为内存空间中与之对应的物理地址。④存储扩充功能。借助虚拟存储技术（见虚拟存储器）在逻辑上扩充存储容量，在大容量外存支持下，将一部分暂不运行的代码先置于外存，需要时才调入内存，可使大作业在较小内存中运行。请求页式和请求段式存储管理技术可很好地实现虚拟存储技术。

进程管理 在时间上重叠的多个程序段的执行称为并发执行。为描述程序的并发执行引入进程概念——可并发执行的程序在一个数据集合上的运行过程，进程也称为任务。进程管理包括：进程配置、进程状态、进程控制、进程调度和进程通信。①进程配置：为描述进程的动态变化过程并使之能独立运行，应为它配置进程控制块（process control block, PCB）。从结构上看，进程是由程序段、数据段和 PCB 三部分组成。②进程状态：运行中的进程处于就绪状态、执行状态和阻塞状态三种状态之一。把处于相同状态的进程排在一个队列而形成进程队列。③进程控制：对系统中全部进程实施有效的控制和管理。包含进程的创建和撤销，进程的挂起和激活，进程的阻塞和唤醒。④进程调度：按一定的算法，动态地把处理机分配给就绪队列中的某个进程，使之执行。⑤进程通信：在进程之间所进行的一切信息交换。若仅在相互合作的进程之间交换少量的信息以保持进程之间的协调运行，则称为进程同步。一次仅允许一个进程使用的资源称为临界资源。每个进程中访问临界资源的那段程序称为临界区。诸进程进入临界区时必须互斥称为进程互斥。

线程是操作系统分配 CPU 时间的最基本实体，比进程更小的能独立运行的基本单位。线程与进程有许多相似之处：①线程可并发执行；②线程在生存期内有运行、等待、就绪等不同状态；③为了对线程进行有效的控制与管理，需要为每个线程设置描述表；④线程之间也存在通信、同步和互斥问题。线程具有许多传统进程所具有的特征，又称为轻型进程；而把传统进程称为重型进程，它相当于只有一个线程的任务。在引入线程的操作系统中，通常一个进程有若干个线程，至少也需要有一个线程。如在 Windows 中，进程定义为操作系统要处理的作业，每个进程独立分配一个虚拟地址空间和消息队列，一个进程可分解成多个线程，属于进程的所有线程共享进程的虚拟地址空间、全局数据及其他资源；进程本身不含有可执行代码，线程是 Windows 中最基本的执行实体。

设备管理 登记各个 I/O 设备状态，管理并完成用户提出的 I/O 请求，按一定的策略为用户分配 I/O 设备，同时提高 CPU 和 I/O 设备的利用率，提高 I/O 速度。设备管理的主要功能：①缓冲管理。对各种类型的缓冲区进行管理。②设备分配。按照设备的类型和一定的分配算法把设备分配给某些进程，同时还应分配相应的控制器和通道。③设备处理。启动指定设备进行数据传送操作，并对设备或通道发来的中断请求作出及时响应和处理。④设备独立性和虚拟设备管理。

文件管理 文件指具有符号名的一组相关联元素的有序序列。文件系统是负责存取和管理文件的机构。文件的逻辑结构有两种：一种是无结构的流式文件，另一种是记录式文件。文件的物理结构可分为顺序结构、链式结构和索引结构三种。文件管理的主要功能：①文件存储空间的管理。根据用户请求，实施磁盘块的分配和释放。②目录管理。为每个文件建立一个目录项，文件目录可采用单级、二级或多级目

录结构。③文件读写管理。对读操作，是把信息从磁盘读入缓冲区后，再复制到用户区；写操作是与读操作相反的过程。④文件保护。禁止未经核准的用户存取文件，防止核准的用户以不正确的方式存取文件。⑤向用户提供接口。用于建立、打开、关闭和读写文件。

作业管理　控制和调度作业的执行。作业管理程序是用户与操作系统的接口。它可分为：①程序与操作系统的接口。用户可在程序中直接或间接地使用系统调用命令取得系统服务。②用户与操作系统的接口。通过输入控制命令向操作系统提出请求，又可分为联机用户与操作系统接口和脱机用户与操作系统接口。作业管理的另一个重要功能是作业调度，按照一定的算法从后备作业中选取若干个作业，为它们分配资源后调入内存，准备运行。

发展方向　操作系统经过20世纪60年代、70年代的大发展时期，到80年代已趋于成熟。随着超大规模集成电路和计算机体系结构的发展，使操作系统沿着两个方向发展：①配置在微机中随着微机的发展而发展的微机操作系统；②向更高水平发展的网络操作系统、分布式操作系统、并行操作系统和智能操作系统。其中，并行操作系统和智能操作系统还在研究中。

微机操作系统　已经由20世纪80年代的8位或16位微机操作系统CP/M和MS-DOS发展为90年代的32位Windows操作系统。Windows提供了支持多道程序运行的窗口操作环境，具有直观的图形用户界面、方便的图标点击使用方式、多进程处理、网络服务及支持多媒体技术等特点，它已发展成为64位的微机操作系统。从20世纪80年代开始，UNIX逐渐成为一种通用的、多用户交互式分时操作系统，更是各种网络服务器的主流操作系统之一。

网络操作系统（network operating system，NOS）配置在网络中，用统一的方法管理用户通信和网络共享资源，协调各计算机的运行，以及方便网络用户的软件集合。通常NOS是建立在各计算机原有操作系统基础上的单独的一层软件，是网络用户和单机操作系统之间的接口。NOS的主要功能：实现全网范围的文件系统，提供统一的文件传输和存取机制，对网络中的硬、软件资源的有效管理，提高系统的性能和可靠性。确保文件和数据的安全性和保密性等。

分布式操作系统（distributed operation system，DOS）为分布式计算机系统配置的操作系统。它是直接对系统各类资源进行动态分配，有效地控制和协调诸任务的并行执行，并向用户提供统一的、有效的接口的软件集合。在构造DOS时，通常是摒弃原有的单机OS，而完全重新建立。DOS的特点是任务、功能及管理控制的静态或动态分布。DOS的主要功能是实现分布式进程通信与同步，对系统中的各类资源实施有效管理，将一组能并行执行的任务集，同时分配到多个处理单元上，使之能并行执行，并可将管理程序由一台处理机浮动到另一台处理机上。

celiang fangdaqi

测量放大器

（instrumentation amplifier）　把集成运算放大器接成能放大各种传感器输出的微弱电信号的放大电路，又称仪表放大器或数据放大器。在电力系统中经常要测量温度、湿度、压力和流量等参数，传感器首先把这些非电量转换成电量（电压、电流或电荷）。一般情况下，传感器的输出信号较小，通常为毫伏级，甚至微伏级，因此，必须经测量放大器进行放大，并经适当处理后用于控制、显示和记录。

对测量放大器的要求是：①为放大微弱的电信号，放大器本身应具有很小的失调电压U_{os}、噪声电压U_n和很小的温漂，即U_{os}、U_n应小于传感器的输出信号；②放大器应有很高的输入阻抗Z_i，Z_i应远大于传感器的输出阻抗Z_o；③放大器应有较高的共模抑制比K_{CMR}，以便抑制输入回路中的同相干扰。此外，对测量放大器的增益带宽积、非线性度、使用的温度范围等要根据使用场合提出具体的要求。

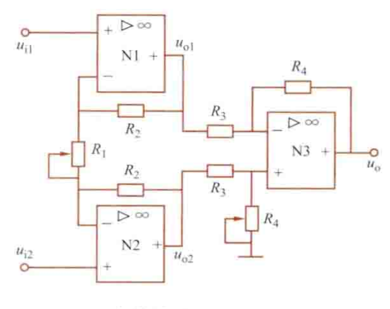
图为测量放大器的原理电路。传感器的两根输出线分别接到运算放大器N1和N2的同相输入端，它们的输出送到差值放大器N3。设N1、N2和N3均为理想元件，则

$$u_{o1}=u_{i1}-(R_2/R_1)(u_{i2}-u_{i1}) \qquad (1)$$

$$u_{o2}=u_{i2}+(R_2/R_1)(u_{i2}-u_{i1}) \qquad (2)$$

$$u_o=\frac{R_4}{R_3}(u_{o2}-u_{o1})=\frac{R_4}{R_3}\left(1+\frac{2R_2}{R_1}\right)(u_{i2}-u_{i1}) \qquad (3)$$

若两输入信号只包含共模分量u_{ic}，即$u_{i1}=u_{i2}=u_{ic}$，则由式（1）～式（3）得$u_{o1}=u_{o2}=u_{ic}$，$u_o=0$。可见，输出信号u_o完全不含共模分量，故图示电路具有较高的共模抑制比。但是，由于N1、N2、N3所允许的最高共模电压u_{icm}一般只有几十伏（20～30V），所以，u_{i1}和u_{i2}中的共模分量最高只能有20～30V。又因u_{i1}和u_{i2}接到N1、N2的同相输入端，故具有很高的输入阻抗Z_i，Z_i比传感器的输出阻抗Z_o大得多，符合对测量放大器的要求。



测量放大器原理图

在有些系统中，传感器的两根输出线（一端接放大器输入端，另一端接传感器和放大器的机壳）相对于大地具有很高的电位，因此传感器输出信号的接地端与显示仪表的接地端（通常为真正的大地或显示仪表的机壳）之间存在着很高的直流或交流电位差，这两个“地”之间如果不加绝缘隔离，势必造成显示误差或损坏元器件。为此，传感器的输出信号必须先通过一个隔离放大器，把两个“地”之间的高电位差加以隔离。

celiang qiuxi

测量球隙

（sphere-gap for measurement）　利用球-球间隙的放电原理构成的高电压测量装置。可直接测量交流高电压（包括较高频率下的衰减和不衰减交流电压）、直流高电压和冲击高电压。它由一对直径为D、间隙为s的铜球组成。当$s<0.5D$时，球隙间为稍不均匀电场，此时放电电压分散性较小，故可利用球隙的放电来测量高电压。方法是，将被测电压加于球隙，改变球隙距离s至球隙恰好放电，该球隙的放电电压值就是被测电压。球隙所测得的是高电压的峰值。

被测电压越高，需用的铜球直径越大，国际电工委员会（IEC）提出了不同直径（2～200cm）、不同间隙下球隙的标准放电电压表作为测量依据，有关的中国国家标准中也引用了该表。气体间隙的放电电压受大气条件的影响，它随气压的升高而升高，随绝对温度的升高而降低。在不均匀电场中，湿度增大时，气体间隙的放电电压会有所上升，影响比较显著；在均匀电场下影响不显著。空气的放电电压与空气的相对密度 δ 有关，故放电电压表是指标准大气状况（即气压101.3kPa，气温20℃），平均湿度为8.5g/m下的数值，若测量时大气条件与标准值不同，必须进行校正。非标准状态下放电电压值 U 等于标准状态下放电电压值 U_N 乘以空气相对密度 δ，$\delta=\frac{p}{p_0}\frac{273+t_0}{273+t}$（$p$ 为大气压力，p_0 为标准大气压力，kPa；t 为气温，t_0 为标准气温，℃）。湿度校正因数 k 按 $k=1+0.002(h/\delta-8.5)$ 计算（h 为测量时的绝对湿度，g/m^3）。

为防止球隙放电的短路电流烧损球面和阻尼电路中因刷状放电而引起高频振荡（后者会使球隙发生异常放电），在使用球隙测量交流和直流电压时，经常需要与其串联一个保护电阻。IEC推荐的电阻值为100kΩ～1MΩ。

为保证测量准确度，对球表面光洁度、球面曲率、球径球杆尺寸、与周围物体距离以及加电压方式等都有一定的要求。在满足这些条件的情况下，对交流、冲击电压的测量不确定度为±3%。

测量球隙是可直接测量数百千伏至数千千伏高电压的设备，可用于测量交、直流和冲击电压，而且结构简单可靠。其缺点是，使用时必须放电，测量稳态电压要做校订曲线，测量冲击电压要用50%放电电压法，并且要校订大气条件等，测量过程较繁琐费时，而且易受周围环境条件影响而发生异常放电。但中国国家标准规定，测量球隙是可与认可的交流高电压和冲击高电压测量系统进行比对的一种标准测量装置。有时还用它作为试验时防止电压过高的保护装置。

中国国家标准和IEC标准已推荐采用棒间隙来代替球隙测量直流高电压。

cengci shujuku

层次数据库 （hierarchical database） 采用层次原理和方法，以层次数据模型为基础建立的数据库。一般是指由层次数据库管理系统产生的层次数据库。层次数据模型是以记录类型为结点的有向树，也就是一棵倒置树，除根结点外，任何结点都有且仅有一个上层结点。记录类型简称记录型。每个记录型可包含若干字段。记录型用来描述实体，字段用来描述实体的属性。两个记录类型之间值的联系为一个上层记录值对应多个下层记录值，称为一对多的联系，每一个记录值都不能脱离它的上层记录值而单独存在。记录值是指用标记装置记录在表上的值，该表上标有区分记录的参考值。这样，记录值也成为一棵倒置树形。层次数据库就是把这样一棵棵的树形数据存储起来，并且在树与树之间建立起联系，成为一个完整的数据库。

chadong fangda dianlu

差动放大电路 （differential amplifier） 能把两个输入电压的差值加以放大的放大电路，也称差分放大电路。差动放大电路采用对管（双极型晶体管、单极型场效应管、电子管）作为它的有源器件。按电路结构不同有基本差动放大电路、恒流源差动放大电路和集成差动放大电路。

基本差动放大电路　晶体管基本差动放大电路如图1所示。这是一个对称电路。输出电压 u_o 是晶体管V1和V2集电极输出电压 u_{o1} 和 u_{o2} 之差 $u_{o1}-u_{o2}$。当V1和V2的输入电压幅值相等且极性相反，即 $u_{i1}=-u_{i2}$（称差模输入电压）时，差动放大器的电压放大倍数（差模电压放大倍数，记为 A_{ud}）和单管放大器的电压放大倍数相等，即 $A_{ud}\approx\beta R_c/r_{be}$，式中 $R_c=R_{c1}=R_{c2}$，r_{be} 为晶体管输入电阻，$r_{be1}=r_{be2}=r_{be}$。当两输入电压的幅值与极性均相等时，即 $u_{i1}=u_{i2}$（称共模输入电压），放大器的输出电压 u_o 应等于零，电压放大倍数（称为共模电压放大倍数，记为 A_{uc}）也等于零。实际放大器不可能两边完全对称，因而还有一定的共模放大倍数。在实际应用中，有共模干扰产生的共模输入；也有温度变化和电源电压不稳等因素对差动放大器的干扰，相当于分别给两个晶体管的输入端加了一个大小相等方向相同的漂移电压产生的共模输入。利用电路的对称性可以使之相互抵消或予以削弱，使输出端的漂移电压大大减小。电路对称性越好，共模电压放大倍数就越小，输出端的漂移电压也会越小。

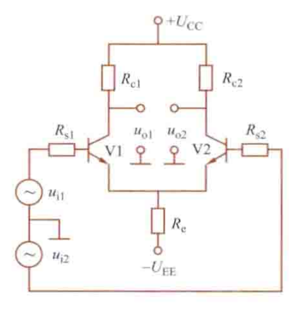


图1　基本差动放大电路

差动放大电路可以是双端对称输入和输出，也可以是单端不对称输入和输出，故也常用其实现双端与单端电路的相互转换。

差动放大电路的主要性能指标有：A_{ud} 是有用信号的放大倍数，越大越好；A_{uc} 是无用信号的放大倍数，它表明零漂（见直流放大电路）的程度，越小越好。通常用一个综合指标——共模抑制比 $K_{CMR}=|A_{ud}/A_{uc}|$ 来衡量，K_{CMR} 值越大，表明电路抑制共模信号的性能越好。一般差动放大电路的共模抑制比用分贝表示时约为几十分贝，性能好的可达一百分贝以上。分析表明，图1所示电路单端输出时的共模抑制比 $K_{CMR}\approx\beta R_e/r_{be}$。

恒流源差动放大电路　为了提高差动放大器的共模抑制比，通常采用图2的恒流源电路代替发射极公共电阻 R_e。该电路是一种零点漂移很小的直接耦合放大电路，常用于直流放大，已广泛用于线性集成组件的输入级电路。

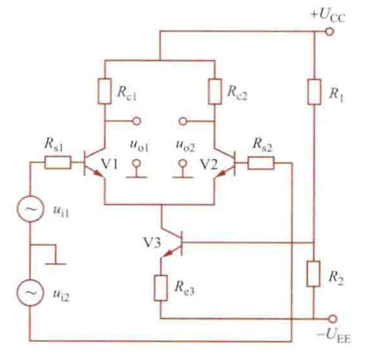


图2　恒流源差动放大电路

集成差动放大电路　图3是采用集成运算放大器构成的差动放大电路。它是能把两个输

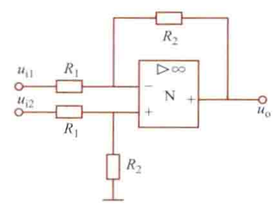


图 3　集成差动放大电路

入电压的差值加以放大的电路，其输出电压u_o与两个输入电压u_{i1}和u_{i2}的关系为

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1}(u_{i1} - u_{i2})$$

这种集成差动放大电路已广泛用于各种运算电路中。

chazhaobiao

查找表　(search table)　由同一类型的数据元素(或记录)构成的以查找为核心运算的集合。查找表的记录中包含有处理过程中反复使用的“控制”信息字段，这种字段称为关键字。查找过程是将关键字与某一值（一给定值或者某一文件当前记录的关键字等）进行比较，直到匹配成功或者整张表查完为止。若对查找表只做查找的操作，称此类查找表为静态查找表。若在查找过程中同时插入查找表中不存在的数据元素，或从查找表中删除已存在的某个数据元素，称此类表为动态查找表。静态查找表常用的查找方法有顺序查找、分块查找和折半查找等。动态查找表常用的查找方法有二叉排序树的查找、B一树和B+树的查找、数字查找树的查找和直接查找等。

顺序查找　从表的起始位置（或某一指定位置）开始，向下依次地将各记录关键字与给定的值进行比较，直到查找成功或扫描到表结束为止。顺序查找简单且适应面广，对表的结构无任何要求，无论元素是否按关键字有序都可应用。但其查找速度慢，在包含 n 个记录的表中查找某一元素，查找成功的情况下平均需要与一半的元素进行比较。

分块查找　当表中的元素是分块有序时（即表中后面块中所有记录的关键字均大于前面块中最大的关键字或小于前面块中最小的关键字），建立一个索引表，存放每个块中最大或最小的关键字及它们在查找表中的位置，索引表按关键字有序。查找时，将给定值和索引表中的各个关键字进行比较，以确定待查元素所在的块，然后再在相应的块中进行查找。由于索引表和每个分块中记录的个数远小于查找表本身的大小，相对于顺序查找而言，分块查找要快很多。分块查找的平均查找长度不仅和表的长度有关，也和分块的大小有关。

折半查找　当查找表按关键字有序时，用处于表区间中间位置记录的关键字和给定值比较，若相等，则查找成功；若不等，则根据比较结果来决定在前一半还是后一半表中继续查找，直到新的区间中间位置记录的关键字等于给定值，或者查找区间的大小等于零时为止（表明查找不成功）。在包含 n 个元素的有序表中查找任一元素时，最多只做$\lfloor \log_2 n \rfloor+1$ 次比较。

二叉排序树的查找　二叉排序树或是一棵空树，或是具有下列性质的二叉树：若它的左子树不空，则左子树上所有结点的关键字值均小于它的根结点的值；若它的右子树不空，则右子树上所有结点的关键字值均大于或等于它的根结点的值；它的左、右子树也称为二叉排序树。在二叉排序树上查找某一元素的过程为：当二叉排序树不空时，首先将给定值和根结点的关键字值比较，若相等，则查找成功；否则将依据给定值和根结点关键字值之间的大小关系，分别在左子树或右子树上继续进行查找。二叉排序树的平均查找长度和树的形态有关，最好的情况是二叉排序树的形态和折半查找的判定树相同，其平均查找长度与 $\log_2 n$ 成正比。在动态建立二叉排序树的过程中，为了使其形态接近折半查找的判定树，需要对其进行平衡化处理。

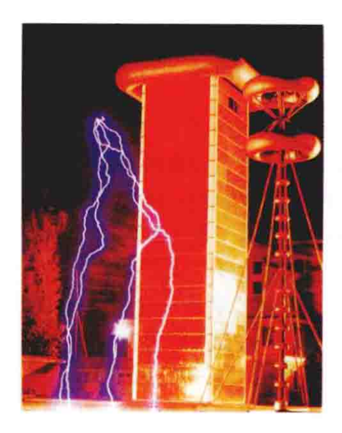
B一树和B+树的查找　B一树和B+树均属于树形索引结构。树形索引既能进行快速查找，又易于索引结构的动态变化。在B一树上查找所需的时间取决于两个因素：一是等于给定值的关键字所在结点的层次数；二是结点中关键字的数目。在包含 n 个关键字的 m 阶B一树上进行查找时，从根结点到关键字所在结点的路径上涉及的结点数不超过 $\log_{\lceil m/2 \rceil}[(n+1)/2]+1$。

数字查找树的查找　数字查找树是一棵度大于或等于2的树，树的每个结点只含有组成关键字的符号。从根到叶子结点的路径上，所有结点的符号组成的字符串表示一个关键字，叶子结点中含一个特殊符号表示字符串的结束。数字查找树的深度取决于关键字中字符的个数。在数字查找树上查找某一关键字的过程为：从根结点出发，沿着和给定值相应的指针逐层向下，直到叶子结点。若该结点中的关键字和给定值相等，则查找成功，否则查找不成功。在数字查找树中，查找某一关键字的平均查找长度为 $h(d+1)/2$，其中，d 为数字查找树的度，h 为关键字中字符的个数。

直接查找　将关键字进行变换计算出相应表项位置的一种查找方法。通常使用的是*散列算法*，它适用于关键字取值范围大而实际使用范围有限的场合。

chang kongqi jianxi jichuan

长空气间隙击穿　(breakdown of long air gap)　长达数米甚至数十米空气间隙的击穿。为适应高压、超高压和特高压输电的需要，必须合理决定架空线路和变电站的空气绝缘距离，为此需要研究长空气间隙的击穿特性。模拟电力系统运行的实际情况时，作用在间隙上的电压，除了考虑正常工作下的工频交流电压外，还要考虑由雷电及操作或事故引起的过电压。这些过电压通常用雷电冲击电压或操作冲击电压来代表（见*冲击电压发生器*）。图1所示为空气间隙的击穿通道。


图 1　空气间隙冲击电压放电试验

对正棒-负板间隙放电发展过程的快速照相说明：先在正棒电极端部出现电晕及流注，然后发展成先导。所谓先导就是由多个流注汇集在一起所形成的较粗的、电导率较高的放电通道，先导前端有流注在继续发展（见*流注放电理论*）。当先导接近负板电极时，发展特别快，迅速使间隙击穿，称为“末跃”阶段。

长空气间隙击穿电压受电压波形、电压极性、电极形状、电极布置、海拔高度等因素的影响。图2示出了工频电压下和冲击电压下正棒电极对负板电极的击穿电压 U_{50}（工

频电压下为平均击穿电压，冲击电压下为50%冲击击穿电压）与电极间距离 d 的关系曲线。

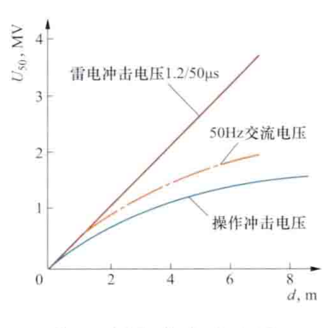


图2　间隙的击穿电压

由图可见，间隙的雷电冲击击穿电压最高。另外可以看出，当放电间隙增大时，工频和操作冲击击穿电压有饱和的趋势。举例来说，2m长的间隙，工频交流击穿电压约为900kV峰值，平均击穿场强约4.5kV/cm。而16m长的间隙，平均击穿场强只有约1.4kV/cm。

长间隙的击穿电压主要靠试验法确定，但是这需要规模很大的试验设备，费用很高。因此，用计算法来求得击穿电压，以代替试验法，就成为一个重要的研究课题。一种方法是按放电的发展过程，建立简化模型，计算出击穿电压。另一种方法是用“间隙系数”估算。正棒电极对负板电极间隙的击穿电压已经有许多数据。若间隙距离相同但电极结构不同，则可以根据试验数据乘以间隙系数以获得击穿电压。近年来，随着数值计算能力的增强和科学观测能力的提升，国内外研究者提出了越来越接近长空气间隙放电发展物理过程的理论模型及其关键物理参数，放电过程的模拟仿真不断在取得进展。即使如此，上述方法都还不能完全代替直接试验法。

changxiaoying bandaoti qijian

场效应半导体器件 (field-effect semiconductor device)

利用电场效应控制电流的半导体电子器件。场效应半导体器件通常称为场效应晶体管，它分为结型场效应晶体管和绝缘栅型场效应晶体管两大类，它们都是以半导体中的多子来实现导电，所以又称为单极型半导体器件。结型场效应晶体管是依靠改变PN结中耗尽层的宽度来改变漏极电流的，故其PN结只能工作在反偏状态。与双极型晶体管（见双极型半导体器件）相比，场效应晶体管的噪声较低，所以在低噪声放大器的前级常选用场效应晶体管。场效应晶体管是电压控制器件，栅极基本上不取电流，而双极型晶体管的基极总要取用一定电流，所以在只允许从信号源取极小量电流的情况下，应该选用场效应晶体管。

场效应晶体管的制造工艺比双极型晶体管简单得多，且所占用的芯片面积小。尤其是MOS场效应晶体管，其所占用的芯片面积仅为双极型晶体管的15%。因此特别适合于制造大规模集成电路。

场效应晶体管的源极s和漏极d的结构通常制成对称的，因而可以互换使用（但对源极与衬底已在制造时连在一起的管子，不能互换）。双极型晶体管中，由于发射区与集电区掺杂浓度相差很大，而且集电结与发射结的结面积也相差甚远，因而发射极和集电极一般不能互换使用。

场效应晶体管都是小功率管，工作速度也较低。随着大规模集成电路的发展，特别是采用了将P沟道与N沟道MOS管相结合的所谓CMOS场效应晶体管以后，场效应晶体管的工作速度已有了很大提高。另外，20世纪80年代发展起来的绝缘栅场效应功率晶体管，具有垂直于芯片表面的导电路径，使场效应半导体器件进入大电流、高电压的应用场合，速度也大为提高。

changxiaoying jingtiguan fangda dianlu

场效应晶体管放大电路 (field-effect transistor amplifier)

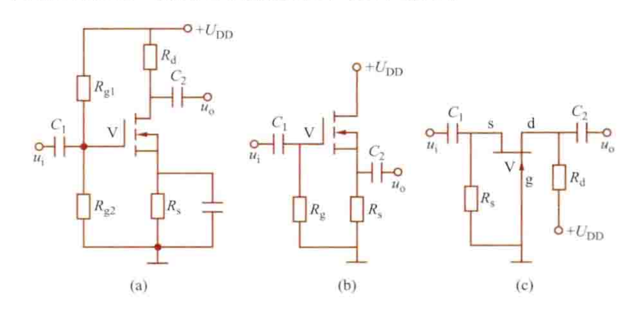
利用场效应晶体管作有源器件的放大电路。场效应晶体管（见场效应半导体器件）是20世纪60年代发展起来的半导体器件。它既有一般晶体管体积小、重量轻、耗电省和可靠性高等优点，又有远比一般晶体管高的输入阻抗。此外，由于MOS场效应晶体管组成的集成电路制造工艺简单、集成度高，因此发展迅速，应用日益广泛。

由于场效应晶体管具有输入阻抗高、噪声低的优点，在多级放大电路中，经常用作前置放大级。利用场效应晶体管的恒流特性，在放大电路中也常作恒流源用。

场效应晶体管的基本放大电路有共源、共漏、共栅三种。

(1) 共源放大电路：见图(a)，其中场效应晶体管是N沟道增强型MOS管。该电路有较大的电压增益、较大的输入电阻，但由密勒效应引起的输入电容太大，影响高频响应，常用作电压放大。

(2) 共漏放大电路：见图(b)，又名源极跟随器，其中场效应晶体管是N沟道耗尽型MOS管。该电路的输入电阻大，输入电容小，电压放大倍数小于1，常用作输入级以提高输入阻抗，或用作阻抗变换、缓冲电路。



场效应晶体管的基本放大电路
(a) 共源放大电路；(b) 共漏放大电路；(c) 共栅放大电路

(3) 共栅放大电路：见图(c)，比共源、共漏放大电路用得少，主要用于高频电路，其中场效应晶体管是N沟道结型场效应管。该电路电压增益大，输入电容小，但输入电阻小。

chaodao cailiao

超导材料 (superconductive materials)

在一定条件下能呈现超导态的物质。可分为超导元素、超导化合物和超导陶瓷三类。

主要电磁特性及参数　①临界温度和零电阻特性。当温度降低到某一特定值以下时，电阻消失，该温度称为这种超导材料的临界温度，以 T_C 表示，当温度高于 T_C 时，又恢复到正常态。用电磁感应的方法使超导体内部产生超导电流，经过一年以上长时间观察，此超导电流无衰减。利用精确的核磁共振方法测量此超导电流产生的磁场，来研究超导电流的衰变时

间，超导电流的衰变时间不短于十万年。因此，从这种意义上可以说超导态具有零电阻特性。②临界磁场。超导态还和外磁场有关。原来处于超导态的物质，当磁场强度增加到某一临界值 H_C以上时，突然转入正常态。如再降低到 H_C以下，又恢复超导态。③完全抗磁性。处于外磁场中的超导体，内部磁通密度等于零，称为迈斯纳（Meissner）效应。

临界温度和临界磁场是超导材料的主要特性参数，是超导材料优劣的标志。1911 年，荷兰物理学家 H.K. 昂尼斯（H.K.Onnes）首先发现汞的超导电性，此后陆续发现多种元素超导材料，临界温度较高的有 Hg(α)，4.153K；La(β)，6.06K；Nb，9.25K；Pb，7.193K；Ta，4.48K；Tc，8.22K；V，5.30K。元素超导材料的临界温度如此低，很难实用；它们的临界磁场 H_C也很低，其中临界磁场较高的 Nb 只有 $1993\left(\frac{10^3}{4\pi}\text{A/m}\right)$，在外磁场中很容易失去其超导性。

超导化合物　为了使超导能有实际应用，人们坚持寻找 T_C和 H_C较高的超导化合物。迄今为止，发现超导性较好的化合物主要有：Nb_3Sn，T_C为 18.05K，H_C为 $2.5\times10^5\left(\frac{10^3}{4\pi}\text{A/m}\right)$；$V_3Si$ 的 T_C 为 17.8K，V_3Ga 的 T_C 为 16.8K，H_C也属同一数量级。

在相当长的一段时间内，提高 T_C和 H_C的研究未获得突破，直到 1986 年后，发现了一系列金属氧化物陶瓷，其 T_C可高达约 100K，被称为“高温”超导材料。1986 年 4 月，德国的 J.G. 贝德诺尔兹（J.G.Bednorz）和瑞士的 K.A. 缪勒（K.A.Müller）发现了临界温度为 35K 的 La、Ba、Cu 氧化物陶瓷超导材料，为提高超导材料 T_C的研究打开了新的局面，获得 1987 年诺贝尔物理学奖。1987 年初美国休斯敦大学朱经武获得 T_C为 98K 的 Y、Ba、Cu 氧化物超导材料。随后中国科学院宣布获得 T_C 为 100K 的超导材料。日本金属材料研究所筑波分所获得 T_C为 93K 及 123K 的两种超导材料。近年来发现的超导材料均属氧化物陶瓷材料。按其主要元素的含量通常称为钇（Y）系、镧（La）系和铋（Bi）系等。

应用　超导材料的应用前景取决于临界温度能否提高。除特殊用途（如降低噪声等）外，使用超导材料旨在降低能量损耗，但同时又要付出用于制冷所需的能量。若临界温度太低，从能量来看得不偿失，没有实用价值，例如不适用于输配电。现有的氧化物陶瓷超导材料 T_C虽可高达 100K 以上，但陶瓷的加工性能差，难以直接用于制造电线电缆；可用于制造超导薄膜传感器及约瑟夫逊电子元件等，在液氮温度（77K）下工作，具有高速和低噪声的特点，也节能，可用电池供电。超导电磁铁已开始应用于某些特殊的场合，因为它可以很小的体积制造出大功率电磁铁。如，用于制造大型高能粒子加速器、磁悬浮列车、医学断层扫描装置等。用于电机的超导绕组常用以金属 Nb、Ti 为主的超导材料，可以达到的允许电流密度为铜导线的 12 倍，T_C为 18K。此外，还正在研制超导电磁推进船。

chaodaoti daodian jili

超导体导电机理　(mechanism of superconductivity)

超导体在临界温度下失去电阻转变成超导状态的规律和本质。某些金属、合金或化合物，在其温度下降到某一临界温度 T_C以下时，其电阻率突然下降到零，进入超导状态，同时呈现完全抗磁性，这种现象称为超导电性。具有超导电性的物体称为超导体。

超导状态　对于绝大多数超导体，都存在对应的临界磁场 H_C。只有外加磁场 $H<H_C$时，才能保持超导电性；当 $H>H_C$时，相变为正常态，超导态即被破坏。临界磁场是温度的函数，其近似式为

$$H_C = H_0[1-(T/T_C)^2] \tag{1}$$

式中 H_0为 0K 时的临界磁场。有些超导体只存在一个临界磁场，称为第一类超导体；有些超导体存在两个临界磁场（下临界磁场及上临界磁场），称为第二类超导体。当外加磁场增强到下临界磁场时，第二类超导体内部形成超导态与正常态并存的混合态；当磁场继续加强达到上临界磁场时，超导体内的超导态完全消失而转化为正常态。另外，足够强的电流（大于临界电流 I_C）通过超导体时，也能破坏其超导状态。

超导状态最早是 1911 年由荷兰物理学家 H.K. 昂尼斯（H.K.Onnes）发现的，在 4.2K 的极低温度下，汞样品的电阻在极小温度范围内急剧下降到零。1933 年 W. 迈斯纳（W.Meissner）等人发现了超导体具有完全抗磁性，它在外磁场中时只有极小的磁场穿透深度，这种效应称为迈斯纳效应。

超导理论　1935 年 F. 伦敦（F.London）和 H. 伦敦（H.London）兄弟在经典电动力学范围内建立了第一个比较完整的超导理论。伦敦第一方程为

$$\boldsymbol{E} = \frac{m}{n_s e^2}\frac{\partial \boldsymbol{J}_s}{\partial t} \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{E}$ 为电场强度；m 为超导电子质量；e 为超导电子电荷；n_s为超导电子数密度；$\boldsymbol{J}_s$为超导电流密度；t 为时间。由伦敦第一方程可以看到，当电场强度 $\boldsymbol{E}=0$ 时，超导电流密度 $\boldsymbol{J}_s$为常矢量，说明这是一种无电阻、无损耗的电流。伦敦第二方程为

$$\nabla\times\boldsymbol{J}_s = -\frac{n_s e^2}{m}\boldsymbol{B} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{B}$ 为磁通密度。该方程可以解释迈斯纳效应。

伦敦方程是一种宏观的经典理论，它不能从微观上解释超导现象出现的机理。由伦敦方程推算出的电磁场穿透深度（约为 10^{-8}m 数量级）也与实验事实有较大误差。

在超导微观理论方面最为成功的工作，是 1957 年由 J. 巴丁（J.Bardeen）、L. 库珀（L.Cooper）和 J. 施里弗（J.Schrieffer）共同完成，后来被称为 BCS 理论。按照这一理论，超导电性的起因是费米面附近的电子之间通过交换声子而发生吸引作用，因此，这些电子能克服库仑斥力而两两结合，形成自旋方向相反而总动量矩为零的电子对，称为库珀对。超导电性的出现在本质上是一种量子效应，大量库珀电子对的有序流动即形成超导电流，它与普通导体中的正常态电子不同，在流动中不会产生能量损耗，这就解释了零电阻的本质。超导体受热时从外界吸收能量，会使库珀对遭到破坏，因此在温度 $T>T_C$时，全部库珀对解体，从而材料的超导电性不复存在。

超导体中的电子能级分布存在能隙，能隙以下的电子必须吸收某一最小能量 Δ 才能被激发到能隙以上的状态。Δ 值随温度而变化，在绝对零度时，Δ 值最大，记为Δ_0，而在温度趋近 T_C时，Δ 值迅速减小并趋于零。按照 BCS 理论，每破坏一个库珀对，超导体至少要吸收能量 2Δ。计算给出 $2\Delta_0=3.53kT_C$，式中 k 为玻耳兹曼常数。对于绝大多数材

料，Δ值很小，在 10^{-2} K 的极端低温下，热运动就足以破坏所有库珀对，因此只有在非常接近绝对零度时，这些材料才会呈现超导电性。但对于某些材料，在较高温度下仍有部分电子以库珀对形式存在，使物体具有超导电性。BCS 理论较好地说明了当时已知的实验事实，并成功地预言了若干新的超导现象，因此巴丁、库珀和施里弗于 1972 年获得了诺贝尔物理奖。

超导应用　1962 年，由 B. D. 约瑟夫逊（B. D. Josephson）在理论上预言，随后由 P. 安德森（P. Anderson）和 J. 罗厄耳（J. Rowell）用实验观测证实，如果两块超导体之间用一薄绝缘层（厚度为 10^{-9} m 数量级）隔开，形成低电阻联结，则库珀对可以通过量子力学隧道效应在结的两侧流通，形成约瑟夫森电流，同时产生各种特殊的约瑟夫森效应。这一工作获得了 1973 年诺贝尔物理奖。

超导电性具有极其广泛的应用前景，但因过去获得的各种超导材料的临界温度 T_C 很低，都在液氦温区，使超导材料的实际应用受到很大限制。人们迫切希望在理论指导下寻找 T_C 较高的超导材料，直到 1973 年，制成的 Nb_3Ge 的 T_C 达到 23.2K，以后又多年未能进一步提高。超导体仅在极少数尖端科学或高技术领域中得到个别应用，如超导磁铁、约瑟夫森器件等。1986 年后，在超导研究中出现新的突破，制成了多种新型高温超导材料，其 T_C 可达到液氮温度，此项研究获得了 1987 年诺贝尔物理奖。这些新材料的性质已不完全能用 BCS 理论解释，各国学者正积极开展新的理论和实验研究工作，先后提出了共振价键理论、双极化子机制、激子机制、等离子体机制、杂质跃迁机制等。

chaoqian buchang

超前补偿　（lead compensation）　为改善控制系统的动态响应速度而采用超前网络对系统进行的补偿。超前网络用得最广泛的是电网络，也可能是机械的、气动的、液压的或者是它们的混合形式的网络。它输出正弦信号的相位超前于输入正弦信号的相位，且超前相位角是输入正弦信号频率的函数。

图 1（a）为一电超前网络的原理图，其传递函数为

$$G_c(s)=\frac{E_o(s)}{E_i(s)}=\alpha\frac{Ts+1}{\alpha Ts+1}=\frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\alpha T}}$$

式中 $T=R_1C,\alpha=\frac{R_2}{R_1+R_2}<1$。相应的频率特性为

$$G_c(j\omega)=\alpha\frac{j\omega T+1}{j\alpha\omega T+1}(0<\alpha<1)$$

图 1（b）为这一超前网络的极坐标图，最大相位超前角 φ_m 出现在频率 $\omega=\omega_m$ 时，其值为

$$\varphi_m=\arcsin\frac{\frac{1}{2}(1-\alpha)}{\frac{1}{2}(1+\alpha)}$$

图 1（c）为这一超前网络的对数坐标图，$\alpha=0.1$，转角频率为 $\omega=1/T$ 和 $\omega=1/\alpha T$，ω_m 是两个转角频率的几何中点，即

$$\lg\omega_m=\frac{1}{2}\left(\lg\frac{1}{T}+\lg\frac{1}{\alpha T}\right),\omega_m=\frac{1}{\sqrt{\alpha}T}$$

超前网络基本上是一个高通滤波器，即高频信号可以通过，而低频信号被滤掉。超前补偿可使动态响应得到显著改善，而对提高稳态精度作用不大。

举一个用根轨迹法设计的例子。系统的前向传递函数为 $G_2=\frac{K}{s(s+2)^2}$，在全负反馈情况下，选择补偿装置，使得闭环响应的上升时间（自 10%～90%）小于 1s，过调量小于 20%。

所要求的性能指标可由一对主导共轭极点 $s_1=-1+j\sqrt{3}$，$s_1^*=-1-j\sqrt{3}$ 来实现，它们是方程 $s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2=0$，$\zeta=0.5$，$\omega_n=2$rad/s 的一对根（见动态响应）。

图 2（a）示出未补偿系统的开环极点 $s=0$ 和 $s=-2$（二重），希望 s_1 是闭环极点，即 s_1 应该在根轨迹上（见根轨迹法）。由图 2（a）可看出，在 s_1 点，G_2 的相角为 $-120°-2\times60°=-240°$。根轨迹上的点，相角应为 $-180°$，因而串联补偿装置在 s_1 点的相角应为 60°。选用 $G_0=\frac{s+1}{s+4}$ 可以符合这一要求，如图 2（b）所示。s_1^* 与 s_1 对于实轴对称。

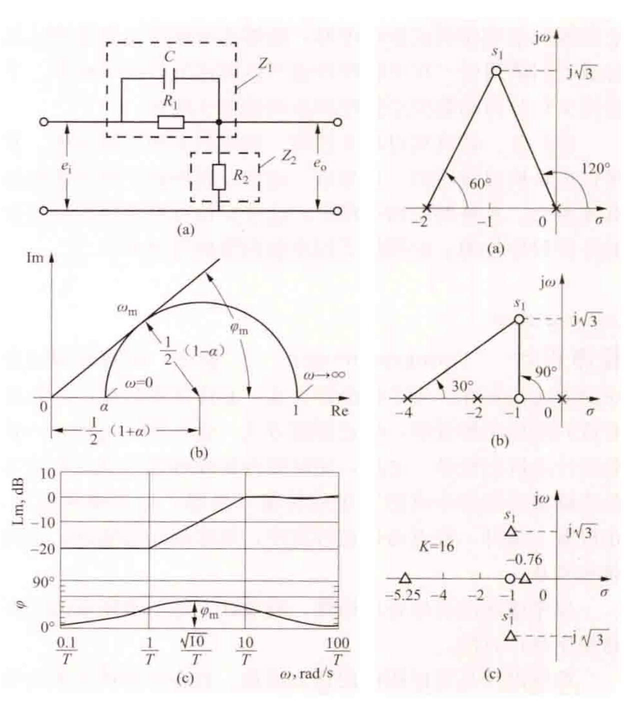


图 1　电超前网络及其极坐标图和对数坐标图
（a）网络图；（b）极坐标图；（c）对数坐标图

图 2　超前补偿的例子
（a）未补偿系统的开环极点；（b）补偿网络的开环极点和零点；（c）补偿后系统的开环极点和零点

用了上述超前补偿之后，可以作出图 2（c）。图上开环极点在 0，−2（二重）和 −4，开环零点在 −1，闭环极点在 $-1+j\sqrt{3}$，$-1-j\sqrt{3}$，−0.76 和 −5.25（对应于 $K=16$）。根轨迹在图中未示出。

超前补偿也可采用频率响应法进行设计。

chengxu

程序　（program）　计算任务的处理对象和处理规则的描述。任何以计算机为处理工具的任务都是计算任务。处理对象是数据，如数字、文字、声音和图像等。处理规则一

般指处理动作和步骤。在低级语言中，程序是一组指令和有关的数据或信息。在高级语言中，程序一般是一组说明和语句，即程序规范说明和程序体两部分。程序规范说明是该程序“做什么”的概括描述，程序体是其实现步骤，即“如何做”的具体描述。构成程序的基本成分包括子程序、协同程序、递归程序和模块等，它们均称为程序单位。程序都是用程序设计语言来书写的。

程序是软件的主体，是软件研究的主要对象。衡量程序质量的准则是正确可靠、简明易读、易维护、易适应和时空开销合理。程序可分为系统程序、应用程序、子程序和程序包。

系统程序　支持计算机系统工作且为所有计算机用户公用的程序。操作系统程序、各种语言的编译程序、编辑程序、调试程序以及作为程序设计环境的各种工具性程序，都是系统程序。通常，系统程序是同计算机本体一道提供给用户的。

应用程序　解决某特定领域的应用问题的程序。

子程序　以良好的算法和数据结构编制成的一组具有独立功能的语句序列或指令序列，能够在程序中反复调用，执行后返回调用处。在子程序内也可以调用另外的子程序。子程序又可分为函数型子程序和非函数型子程序。

程序包　具有相对独立性的一组逻辑上相关的实体。程序包也是构成程序的一种单位。通常，程序包中的实体包括数据类型、数据对象和子程序，这些实体可被引用该程序包的外部程序使用，但隐藏了程序包内部的实现细节。

chengxu sheji

程序设计　(programming)　设计、编制和调试程序的方法与过程。为了得出解决某一具体问题的程序，首先对该问题作求解分析，确定解题方式，设计程序流程图，这是设计阶段的任务。之后，使问题内容或解题计划变为计算机能够接受的指令或语句序列并装入机器，这是编制程序。在机器上编译、检查与试运行程序，排除程序的错误，这是调试程序。

程序追求的目标是正确性、高效性。好的程序来源于好的程序设计方法。

程序设计是目标明确的智力活动，且在软件研究中占有相当重要的地位。研究内容涉及基本概念、规范、工具、方法及方法学等。

程序设计的基本概念有：程序、数据、子程序、协同程序、模块，以及顺序性、并发性和分布性等。程序是程序设计最基本的概念。子程序和协同程序都是为了便于进行程序设计而建立的程序基本单位。顺序性、并发性和分布性反映出程序的内在特性。

程序设计是软件编制工作的重要组成部分，而软件编制是工程性的工作，所以必须要有规范，规范是进行程序设计的具体规定，也是衡量和影响程序设计质量的重要因素。

程序设计是程序领域的基本活动。由于处理对象和处理规则的不同，程序设计主要有：①并发程序设计；②分布式程序设计；③函数式程序设计；④面向对象的程序设计；⑤可视化程序设计；⑥Web程序设计；⑦面向组件的程序设计等。

并发程序设计　设计、编制与调试由若干个可并发运行的程序单位组成的程序的过程。可同时并发执行的程序单位叫进程。组成一个程序的若干个进程并行执行，以完成一个共同的目标。因此，进程之间需要同步和通信，以协调彼此的动作。并发程序设计的主要研究内容有进程同步与通信、死锁的预防和检测、并发程序设计语言等。

分布式程序设计　设计、编制和调试可在分布式处理系统的多台处理机上同时协调运行的程序的过程。分布式程序设计的主要特征是分布与通信。进行分布式程序设计时，一个程序由分布于一个分布式处理系统的若干程序单位组成并且同时执行。在各处理机上的程序单元是相互关联的，在运行中需要同步与通信，以协调工作，完成一个共同的任务。

函数式程序设计　设计、编制与调试函数式程序的过程。用函数式语言书写的程序叫函数式程序，这些程序是用一些原始函数、定义函数等组成的函数表达式。从函数式程序设计的观点来看，程序设计语言可分两类：强制性或过程性语言和函数式程序设计语言。①强制性或过程性语言，即传统的程序设计语言，有PASCAL、FORTRAN、COBOL、ADA等。强制性语言的程序用来执行一串按某种特定次序的命令，在完成这些命令之后就产生所需要的解答。②函数式程序设计语言，如“纯”LISP、FP系统等。函数式语言的程序用来定义一种表达式，这种表达式是一组问题的解。然后，机器利用这种定义去产生关于这种问题中的特定问题的解答。

1977年由J. Backus提出函数式程序设计系统（简称FP系统）。为了定义一个具体的FP系统，要指明一组称为“原子”的基本对象［如十进制数序列，字母A～Z构成的符号串，逻辑值（true，false）等］，从而可推出对象的集合，对象集上定义的原始函数集合组成公式的集合，由此可以推出可定义函数的集合。

函数式程序设计技术在研究传统的程序设计语言的语义、在人工智能领域以及在新一代计算机系统研究中都有着非常重要的意义。

面向对象的程序设计　以对象作为基本程序结构单位，类和继承为构造机制，按照面向对象的程序设计风格设计、编制和调试程序的过程。传统的面向过程的程序设计，把数据与操作分开来定义和处理，程序模块与真实事物间没有一致的联系。面向对象的程序设计，把数据与操作放入单一的对象中，程序是由若干对象及对象间的消息构成的。对象可以代表现实世界中的任何真实事物，对象有自己的特性和行为，用数据属性来描述对象的特性，用操作来描述对象的行为。然后将具有相同属性和操作的对象抽象为类，利用封装、继承、多态三大原则来构造程序。面向对象的程序要用面向对象的程序设计语言编写，如Java、C#、C++、Delphi等。面向对象程序设计的优点：程序模块化有良好的自然基础，对象是基本的模块单位；程序结构清楚，易读易懂；程序可逐步增加而不影响某些其他部分；程序具有良好的可重用性、可扩充性和可维护性。

可视化程序设计　以“所见即所得”的思想为指导，利用软件工具本身所提供的各种控件，通过直观的操作方式设

计程序界面的过程。设计人员可以不编程或者仅编写少量代码，像搭积木一样来构造应用程序的各种界面，随时可以看到结果，程序代码和结果可以同步调整。现在大部分面向对象语言和集成开发环境（integrated development environment，IDE）都支持可视化程序设计，如 VB、VC、Delphi、Visual Studio、Eclipse、NetBeans 等。

Web 程序设计　建立和维护 Web 服务器站点所需要的工具和技术。用户使用客户端的 Web 浏览器如 IE，访问 Internet 上的各种 Web 站点。互联网的发展早期，人们通过浏览器浏览的网页一般是 HTML 静态网页，用户无法在页面中进行交互操作。动态网页技术基于浏览器/服务器模式，在静态的网页中加入各种程序和逻辑控制，实现客户端浏览器同 Web 服务器的动态信息交互。根据脚本程序运行的位置不同，动态页面技术将 Web 程序设计分为浏览器端程序和服务器端程序两部分。浏览器端程序运行在客户的浏览器端，如 VBScript、JavaScript 脚本程序；服务器端程序运行在 Web 服务器上，如 ASP、ASP. NET、JSP、PHP 等开发服务器端程序，当它们收到浏览器端发出的页面请求时，动态生成浏览器端的脚本。

面向组件的程序设计　见程序设计方法。

chengxu sheji fangfa

程序设计方法　（programming method）　用来研究程序设计各阶段工作的原理及其相关设计技术和方法。旨在设计出可靠、易读、性能/价格比适中的程序。程序设计方法包括结构化方法、自底向上法、面向对象的程序设计、面向组件的设计、面向服务的设计。

（1）结构化方法。强调自顶向下、逐步求精、模块化。先从概念出发，构建一个总体模型，将整个任务划分成若干大的模块，再逐步细化，直到实现具体编码。

（2）自底向上法。先从最底层解决具体问题的程序模块入手，逐层向上构造，得到整个软件系统。

（3）面向对象程序设计（object-oriented programming，OOP）。以对象（见面向对象技术）作为基本的抽象单位，将数据和操作封装起来，形成能够独立调用的单元，对象可以重用、继承和扩充。

（4）面向组件的设计（component-oriented programming，COP）。对 OOP 的补充，将面向对象的程序封装成组件，定义一些服务（即一组接口）让外部调用，系统是由一个个组件通过接口搭建成的。如 CORBA、Java EE 的 EJB，DCOM 等。但 COP 与特定程序语言绑定，传输协议各异，各种不同组件之间无法互相调用。

（5）面向服务的设计（service-oriented programming，SOP）采用标准化的简单对象访问协议（simple object access protocol，SOAP），不同语言编写的，不同厂商之间生成的服务（见面向服务的架构）之间可以互相调用。

chengxu sheji yuyan

程序设计语言　（programming language）　为编写系统程序或应用程序而设计的人工指令序列。计算机程序设计语言是按一定规则构成的字符串的总体。定义语言的基本要素是字符集与规则集。按照一种程序设计语言的规则，并由它的字符集内的字符组成的字符串就是程序。规则包含语法规则与语义规则。语法规则规定程序的构造与形式，语义规则表示程序含义。

基本成分　包括数据、操作和控制。①数据：用以表达程序中的数据对象。②操作：用以表达对程序中的数据所进行的操作。③控制：用以表达对数据的控制及对操作的控制。

分类　按照不同的分类原则，产生不同的类别。有五种分类原则：按语言级别、按解决问题的方式、按程序执行方式、按应用领域和按应用范围。

（1）按语言的级别，分为低级语言和高级语言。低级语言包括机器语言和汇编语言。机器语言是唯一可以被计算机直接执行的语言，指令由许多的 0、1 组成，可读性差，是第一代编程语言；汇编语言是第二代语言，它为每个机器代码设计一个助记符，用助记符编出的源程序经汇编，生成二进制目标文件执行。高级语言使用较接近于人的自然语言的程序设计语言，是第三代语言，如 C/C＋＋、Java、C＃、Delphi、PASCAL、FORTRAN、COBOL、ADA 等；第四代编程语言更少关心实现的方法，处理的单元不再是单个的数据单元，而是一批数据单元，如 SQL 语言。

（2）按解决问题的方式，分为面向机器、面向过程、面向对象和面向问题的语言。面向机器的语言如汇编语言；面向过程的语言以“数据结构＋算法”的形式构成程序，有 C、PASCAL 和 FORTRAN 语言等；面向对象的语言以“对象＋消息”的形式构成程序，有 C＋＋、Java、C＃、Delphi 等；面向问题的语言不关心问题的求解算法及求解过程，只需指出问题是做什么，有 APT、LISP、SQL 语言等。

（3）按程序的执行方式，分为解释执行语言、编译执行语言、编译解释型语言。计算机不能直接理解高级语言，只能直接理解机器语言，必须要把高级语言翻译成机器语言，才能执行，翻译的方式有编译和解释两种。①编译型语言在程序执行前，需要把程序编译成为可运行的机器语言（如 exe 文件），程序执行效率高，有 C、C＋＋、Delphi 语言等。②解释性语言不需要事先编译成机器语言，程序运行时由解释器直接执行，每执行一次就要翻译一次，效率较低，有 VB，各种脚本语言如 Perl、Python 等，还有由浏览器中的解释器直接执行的 Web 脚本语言：HTML、JavaScript、VBScript、ASP、JSP、PHP、XML 等。③编译解释型语言，先将原始代码编译成中间代码，然后在虚拟机中解释执行，兼顾了编译型和解释型语言的优势，有 Java、C＃等。

（4）按应用领域，分为单机语言、网络编程语言、数据库语言、人工智能语言等。单机用的语言有 FORTRAN、PASCAL、VB、VC；网络编程语言有 HTML、VBScript、JavaScript、JSP、ASP、PHP、XML、Java、C＃等；数据库语言有 SQL 语言；人工智能程序设计语言有 LISP、逻辑推理程序设计语言 Prolog 等。

（5）按照应用的范围，分为通用程序语言与专用程序语言。应用范围广泛的语言，称为通用语言，如 FORTRAN、PASCAL、COBOL、C、Ada 等。仅适合于单一领域的语言称为专用语言，如 APT 语言。

主要程序设计语言　已得到广泛应用的主要程序设计语言有：APT、FORTRAN、COBOL、ALGOL、BASIC、LISP、GPSS、SIMULA、APL/360、PASCAL、Delphi、C、C＋＋、Ada、PROLOG、Java、Smalltalk、第四代语言、C#等。

（1）APT 语言（automatically programmed tools）。第一个专用程序设计语言，用于数控机床编程。1956 年推出。

（2）FORTRAN 语言（formula translation）。第一个广泛使用的通用高级程序设计语言，适于科学及工程计算问题。典型的版本有：FORTRAN II、FORTRAN IV、FORTRAN77、FORTRAN90、FORTRAN95、FORTRAN2003、FORTRAN2008 等。

（3）COBOL 语言（common business oriented language）。使用最广泛的商用、公用数据处理语言。1960 年推出。

（4）ALGOL 60（algorithmetic language 60）算法语言。第一个用程序设计语言的语法严格形式定义的通用算法语言，也是第一个引入分程序概念及递归过程的语言。1960 年推出。

（5）BASIC 语言（beginners all-purpose symbolic instruction code）。易学易用的通用交互式程序设计语言。有 20 世纪 80 年代后期的 Turbo BASIC、QBASIC 和 1991 年推出的 VB（visual basic）等。VB 采用图形用户界面、面向对象和事件驱动机制。

（6）LISP 语言（list processing）。表处理语言，用于描述列表及其处理的程序设计语言，在人工智能领域内广泛使用。其特点是：函数施用是其唯一的操作。1960 年推出。

（7）GPSS（general purpose system simulator）通用系统仿真语言，广泛应用于系统仿真的程序设计。1961 年推出。

（8）SIMULA67 语言（simulation language）。一种仿真语言，是 ALGOL 60 的扩充，也是第一个面向对象的语言。第一次引入了类（class）的概念，是抽象数据类型、模块、信息隐藏等重要概念的先驱。1967 年推出。

（9）APL/360 语言（a programming language）。一种主要用于科学与工程计算的程序设计语言，特别适用于矩阵运算。1967 年推出。

（10）PASCAL 语言。在 ALGOL 60 基础上发展起来的结构化语言。1971 年推出。

（11）Delphi 语言。在 PASCAL 语言的基础上发展而来的面向对象语言，20 世纪 90 年代后期推出。具有可视化开发环境，适用于数据库应用、通信软件、三维虚拟现实、多媒体应用系统等。

（12）C 语言。一种广泛流行的程序设计语言，具有精干表达式、现代控制结构与数据结构和一组丰富运算符的系统程序设计语言。是 UNIX 操作系统下的主干语言。由于大部分微型计算机和小型计算机都装有 UNIX 系统，因此，C 语言也是最为流行的程序设计语言。1972 年推出。

（13）C＋＋语言。以 C 语言为基础、支持数据抽象和面向对象风格的高级通用程序设计语言。在 20 世纪 80 年代初推出，后又发展出多个系列版本。C＋＋语言是对 C 语言的扩充。C＋＋语言与 C 语言有很好的向上兼容性。它不仅保持了 C 语言的紧凑、灵活、高效和易移植性强的优点，还有可视性特点。C＋＋语言对数据抽象的支持主要在于类的概念和机制，对面向对象的支持主要通过虚拟函数，因此它比 Smalltalk、VB 等语言运行性能高得多。

（14）Ada 语言。20 世纪 80 年代的现代公共基础语言。它是按照软件工程要求设计的语言，特别适宜于嵌入式应用环境。Ada 语言反映了现代软件技术研究的最新成果。主要语言特征有强类型，信息隐藏，模块化，分别编译，多任务并发执行，异常处理能力，类属设施等。最新的 Ada 2012 被认为是信息安全工程和软件可靠性工程的首选最佳语言。

（15）PROLOG 语言（programming in logic）。一种逻辑程序设计语言，已广泛用于人工智能、数理逻辑、关系数据库等领域。1972 年推出。

（16）Java 语言。一种跨平台的、适用于网络环境的面向对象语言。Java 的特性有简单、纯面向对象、平台移植性、编译解释执行、支持多线程和分布式应用、安全性等。广泛应用于个人计算机、数据中心、游戏控制台、超级计算机、移动电话和互联网。1995 年推出。

Java 语法与 C/C＋＋相似，坚持面向对象的基本原理，但避开了运算符重载、多重继承等复杂概念，简化了程序设计。Java 程序用编译解释执行方式，先将源代码编译成中间代码（二进制字节码），然后由各种不同平台上的 Java 虚拟机（JVM）来解释执行字节码，从而实现“一次编译、到处执行”的跨平台特性。用 Java 语言编写的 Applet 通常编译成中间代码，传送到与装有 JVM 的 Web 网站相连的浏览器上，最后加载到客户机上解释执行，使可执行代码独立于软硬件平台。通过 Java 语言所提供的类库，可以处理 TCP/IP 协议（transmission control protocol/internet protocol，传输控制协议/网络协议，互联网中使用的基本通信协议），通过网络地址在网络上访问其他对象，可方便地与其他计算节点协同工作。多线程机制可使应用程序并发执行，其同步机制能有助于实现数据共享。Java 提供的垃圾回收、异常处理、自动捕获类型声明中的常见错误等手段，能防止部分故障，具有一定安全健壮性。

（17）Smalltalk 语言。一种面向对象的程序设计语言。1981 年推出 Smalltalk 80，1984 年作为产品公开。Smalltalk 有对象、类、实例、消息和方法五个核心概念，子类继承父类的一切属性和操作是它的继承性特色，表达式是它的基本语法。Smalltalk 的主要特点：①信息表示与处理高度的一致性；②弱类型语言；③比较完善的抽象机制；④语言融合于环境之中。

Smalltalk 是一种最有代表性的面向对象的程序设计语言，其中的对象类似于框架概念，能把知识等描述成一组对象的类，并以其简洁的程序设计风格而逐渐跻身于人工智能领域。

（18）第四代语言（fourth-generation language，4GL）。一类简单易学，具有良好的用户界面，非过程化程度高，便于非计算机专业人员掌握使用的程序设计语言。它只需告知计算机“做什么”，而不必告知计算机“怎么做”，可直接对数据进行操作，适用于事务处理类应用软件的开发。4GL 语言有数据库查询语言（如 SQL 语言）、报表生成语言、数

据操纵和统计分析语言（如 MATLAB、SAS）等。

（19）C#语言。2000 年发布的，由 C 和 C++继承而来的一种简单、安全、专门为 .NET 应用开发的面向对象程序设计语言。C#继承了 C/C++的强大功能和 VB 的简单可视化操作，还吸收了 Delphi、Java 等的优点，有和 Java 相似的语法和编译成中间代码再运行的过程，可开发控制台应用程序、Windows 应用程序和 Web 应用程序等。C#去掉 C++的复杂性，没有宏和模板、不允许多继承、具有自动内存管理和垃圾回收机制，支持数据封装、单一继承，C#可以同组件对象模型（COM）直接集成。C#的运行机制与 Java 类似，被编译成为中间代码 MSIL（microsoft intermediate language），然后通过 .NET Framework 的虚拟机——通用语言运行库 CRL（common language runtime）执行。C#的特点：语言简洁、保留了 C++的强大功能、快速应用开发功能、强大的 Web 服务器控件、支持跨平台、与 XML 相融合等。

chongji dadianliu celiang

冲击大电流测量

（measurement of high-current impulse） 冲击大电流的峰值和波形的测量。常用分流器或罗戈夫斯基线圈与数字存储示波器或数字记录仪组成的数字测量系统来实现冲击大电流的测量，还可应用磁光效应的光电法来进行测量。

根据中国国家标准，对认可的测量系统要求测量峰值的总不确定度为 ±3% 范围，测得的时间参数不确定度在 ±10% 范围内，能检出叠加在冲击电流上的振荡，标定刻度因数稳定在 1% 范围内。冲击电流的标准测量系统在其使用范围内的总不确定度为：对于峰值电流应为 ±1% 范围，对于时间参数应为 ±5% 范围。确定认可的测量系统标定刻度因数及动态特性时，应采用与标准测量系统比对的方法，对动态特性的校核也可采用阶跃波响应测量法。（见高电压测量）

分流器　一种用来测量冲击电流的传感器。它是一个串接在被测电路中的低阻值无感电阻器。测量被测电流流过分流器时所产生的电压降，可确定电流峰值及其波形。分流器的阻值一般为 0.1～100mΩ，要求它是阻值稳定的纯电阻。在材料选择和结构设计时，应考虑减小趋肤效应和热效应的影响，有时还要求有良好的屏蔽。用分流器和示波器组成的测量系统，如图 1 所示。

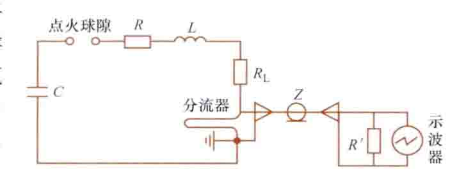


图 1　分流器测量系统

C—储能电容；R—回路电阻；L—回路电感；R_L—负载；R'—匹配电阻；Z—电缆及其波阻抗

分流器按结构分有：①带状对折式；②辫状对折式；③同轴管式；④圆盘式等（见图 2）。其中以圆盘式特性最佳。

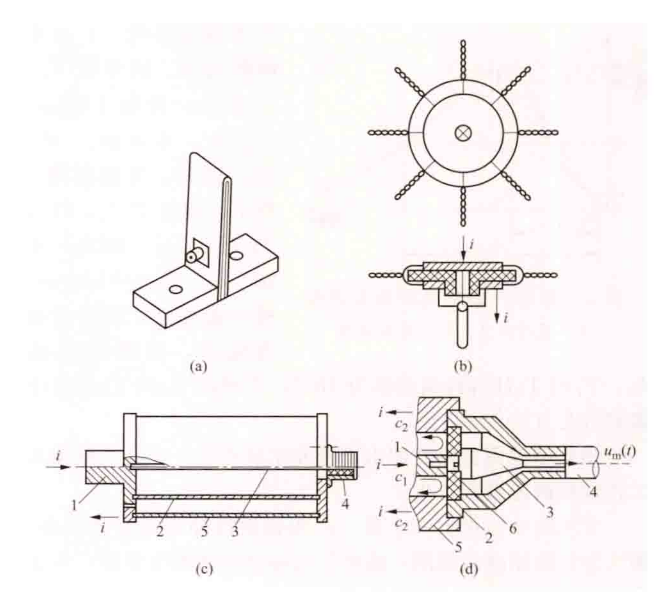


图 2　常用的几种分流器结构示意图

(a) 带状对折式；(b) 辫状对折式；(c) 同轴管式；(d) 圆盘式

1—电流输入端；2—电阻体；3—电位引出导体；4—同轴插座［图 (c)］或同轴插头［图 (d)］；5—导体外圆套；6—绝缘垫块

罗戈夫斯基线圈　测量冲击大电流或电流变化率的一种感应线圈，又称为磁电位计。把作为二次线圈的罗戈夫斯基线圈围住载有被测大电流的单根导体（即为一次线圈），设两者之间的互感系数为 M，则线圈输出端的感应电动势 u_2 与被测电流变化率 di/dt 成正比，即 $u_2(t)=Mdi/dt$，式中 M 与磁导率 μ、线圈的几何尺寸及匝数有关。如果在线圈的两端接上积分器，就可得到与被测电流成正比的电压信号。积分器有两种：一种是电阻电感（RL）积分器，另一种是电阻电容（RC）积分器。

罗戈夫斯基线圈测量冲击电流的特点是性能稳定，线圈与冲击电流发生器放电回路无直接的电联系，可以测量几十千安到几百千安的冲击大电流。图 3 中示明了它的测量原理。

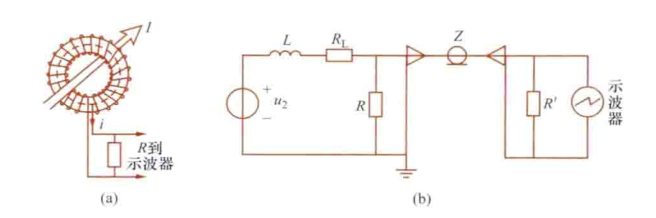


图 3　罗戈夫斯基线圈测量冲击电流示意图

(a) 测量原理；(b) 接 RL 积分器时的整体接线图

R—积分电阻；L—线圈电感；R_L—线圈电阻；Z—同轴电缆及其波阻抗；R'—匹配电阻

chongji dianliu fashengqi

冲击电流发生器

（impulse current generator） 在实验室中产生人工模拟的雷电流或操作波电流的装置。可用来检验电气设备耐受实际雷电流或操作波电流的热和电动力的能力，研究防雷措施的性能、接地体通过冲击电流时的特性等。装置特点是产生的电流持续时间短（从数微秒到数千微秒）和电流峰值很高（从数千安到数百千安）。

冲击电流发生器的应用已超出电力行业和电器制造企业。在等离子体物理、激光技术、加速器等近代科学技术领域中，对冲击电流峰值要求更高，持续时间更短，波形也各异。

标准冲击电流波形　中国国家标准规定的标准冲击电流波形有两类：①指数型波；②方波。指数型波如图 1 所示。

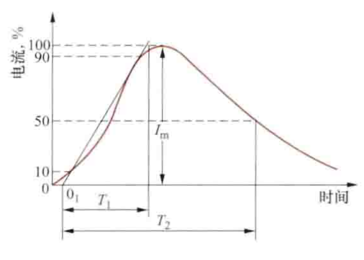


图 1　标准冲击电流指数型波形

0_1—视在原点；I_m—电流峰值

T_1为波前时间，T_2为半峰值时间。波形以T_1/T_2表示，共有1/20μs、4/10μs、8/20μs、30/80μs四种。方波如图2所示，规定$T_f \leqslant 1.5T_d$，T_d为500μs、1000μs或2000μs、2000～3000μs。标准还规定了波形的容许偏差，指数型波的I_m、T_1和T_2的容许偏差各为10%；方波的I_m和T_d的容许偏差各为0%～+20%。

指数型波由雷电波冲击电流发生器产生，方波一般用人工传输线的原理来产生。

雷电波冲击电流发生器　产生指数波冲击电流的设备。图3为它的原理接线图，高电压大容量的储能电容器C先由高压直流装置充电到一定的电压，触发装置点燃了点火球隙FA后，电容C经电感L、电阻R向试品Z放电。流过Z的电流峰值和波形由C上的充电电压U及回路中R、L、C及Z的参数决定。假定回路处于临界阻尼条件，则

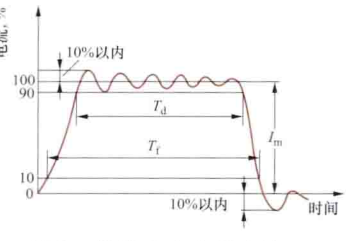


图 2　标准冲击电流方波

T_d—峰值持续时间；T_f—总持续时间；I_m—电流峰值

电流　$i(t) = \frac{U}{L} t \exp\left(-\frac{R}{2L} t\right)$

电流峰值　$I_m = 0.736U/R$

I_m出现的时间　$T_m = \sqrt{LC}$

当要求装置产生很大的电流时，常采用多台电容器并联放电。点火球隙FA是重要元件，要求它动作迅速，能耐受大电流的作用。冲击电流发生器中，通流导体之间存在着强大的电动力，因此该导体应具有足够的机械强度，以防止电动力的破坏。

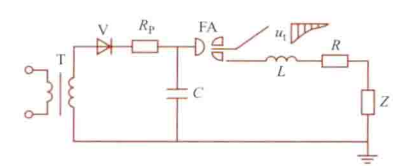


图 3　冲击电流发生器原理图

C—储能电容；FA—点火球隙；T—试验变压器；V—整流元件；R_P—保护电阻；L—回路电感；R—回路电阻；Z—试品

chongji dianya fashengqi

冲击电压发生器　(impulse voltage generator)

人工模拟雷电放电、产生雷电冲击电压或操作冲击电压的装置。它包含一组高压储能电容器，自直流高压源充电几十秒钟，然后通过放电间隙突然经电阻放电，产生具有快速上升前沿的冲击电压波形。冲击电压的持续时间以微秒计，电压峰值一般为几十千伏至几兆伏。产生的冲击电压主要供绝缘的冲击耐压或放电试验之用。在大功率电子束和离子束发生器以及二氧化碳激光器中，可用作电源装置。

冲击电压波形　冲击电压发生器可产生符合中国国家标准和国际电工委员会（IEC）推荐的标准雷电冲击电压波形和标准操作冲击电压波形，以及各种非标准冲击电压波形。

标准雷电冲击电压波形　模拟雷电作用的典型冲击电压波形。它是正或负单极性的一次过程电压波，波形如图1所示。其中0_1为视在原点，T_1为视在波前时间，T_2为视在半峰值时间。标准规定T_1为1.2μs，允许有±30%的容差；T_2为50μs，允许有±20%的容差；波峰值允许有±3%的容差。波形可简单表示成T_1/T_2，如1.2/50波等。

标准操作冲击电压波形　模拟电力系统中因操作或事故造成的过电压冲击波形。一般规定的标准波形如图2所示。波前时间T_1为250μs，允许有±20%的容差；半峰值时间T_2为2500μs，允许有±60%的容差；波峰值允许有±3%的容差。波形可简单表示成T_1/T_2，如250/2500波等。试验变压器类型电器内绝缘的波形，另有规定。

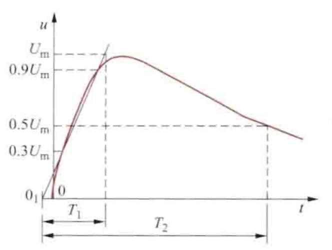


图 1　标准雷电冲击电压波形

0—实际原点；0_1—视在原点；U_m—电压峰值；T_1—视在波前时间；T_2—视在半峰值时间

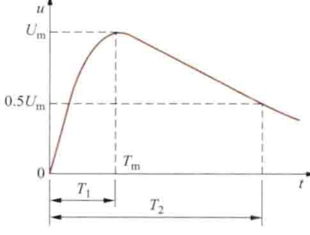


图 2　标准操作冲击电压波形

0—实际原点；U_m—电压峰值；T_m—电压峰值出现的时间；T_1—波前时间；T_2—半峰值时间

基本原理　如图3所示，电容C_1先经整流电源（由升压变压器T、硅整流器V、电阻r组成）充电。当C_1上电压到达U_0时，球隙FA击穿，C_1经电阻R_2放电，并经波前电阻R_1向试品的等效电容C_2充电。当C_2上的电压到达U_{2m}之后，经R_1及R_2放电，使电压u_2逐渐下降。一般$C_1 \gg C_2$，$R_2 \gg R_1$。所以，u_2的上升时间很短，经峰值后下降相对较慢，由此可以形成所期望的冲击波。

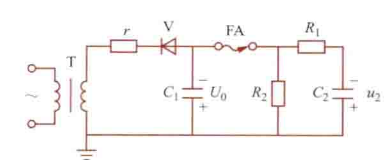


图 3　最简单的冲击电压发生器原理接线

T—升压变压器；r—保护电阻；V—硅整流器；C_1—高压电容器；FA—隔离球隙；R_1—波前时间调节电阻；R_2—放电电阻；C_2—试品及其他负荷电容；U_0—C_1的充电电压；u_2—输出电压

按图3的放电回路可得

$$u_2(t) = \frac{U_0}{k(\beta - \alpha)}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

式中$\alpha, \beta = (a/2) \mp \sqrt{(a/2)^2 - b}$，$a = 1/(R_1C_1) + 1/(R_1C_2) + 1/(R_2C_1)$，$b = 1/(R_1R_2C_1C_2)$，$k = R_1C_2$。

当冲击电压波形确定后，α和β也就确定了。以1.2/50μs波为例，$\alpha \approx 0.01466\mu s^{-1}$，$\beta \approx 2.469\mu s^{-1}$；对250/2500μs波，$\alpha \approx 0.000317\mu s^{-1}$，$\beta \approx 0.016\mu s^{-1}$。视在波前时间$T_1 \approx 3.24R_1C_1C_2/(C_1+C_2)$；视在半峰值时间$T_2 \approx$

$0.69R_2(C_1+C_2)$。

对于大型冲击电压发生器应考虑回路实际存在的电感 L 对视在波前时间的影响。上述估算波前时间的系数 3.24 会有所减小。

多级马克思回路 产生较高冲击电压的多级回路。德国人 E. 马克思（E. Marx）为此于 1923 年获得专利，被称为马克思回路。一种较流行的多级回路如图 4 所示。该图中以四级回路为例，可以推广到更多级。四个电容器 C（电容为 C）并联充电，当达到预定电压时，在 FA1 的发火球上送入数千伏的点火脉冲，促使 FA1 击穿，然后 FA2～FA4 相继击穿，四级电容器形成串联，产生了较高的冲击电压。图 4 在放电时刻的等值电路可以画成图 3。其中 $R_1=4r_1$，$R_2=4r_2$，$C_1=C/4$。推广到 n 级时，上述数字 4 可用 n 取代。通过这种回路可用较低的充电电压产生较高或很高的冲击电压。

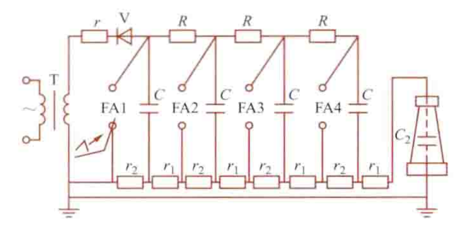


图 4 马克思冲击电压发生器回路接线图
T—升压变压器；r—保护电阻；V—高压硅整流器；C—高压电容器；FA1—发火球隙；FA2、FA3、FA4—中间球隙；r_1—每级的调节波前的电阻；r_2—每级的放电电阻；C_2—试品及其他负荷电容

特性参数 主要特性参数有标称电压、（电压）效率、标称能量、额定冲击电容等。

标称电压 若每级电容器的标称充电电压为 U_N，一共为 n 级，则标称电压为 nU_N。现已有 10MV 的冲击电压发生器。

（电压）效率 若最高的实际输出电压为 U_{2m}，则效率 η 为 $U_{2m}/(nU_N)$。一般产生 1.2/50μs 冲击电压时的效率为 0.8～0.9。

标称能量 以图 3 为例，设 U_0 为电容器的额定充电电压，则标称能量 $W=0.5C_1U_0^2$。大型冲击电压发生器的 W 值可达几百千焦的数量级。

额定冲击电容 若为 n 级，每级电容为 C，则额定冲击电容 $C_1=C/n$。为了电压效率不致过低，C_1 应比试品及其他负荷电容 C_2 大得多。一般为几十纳法（nF）数量级。

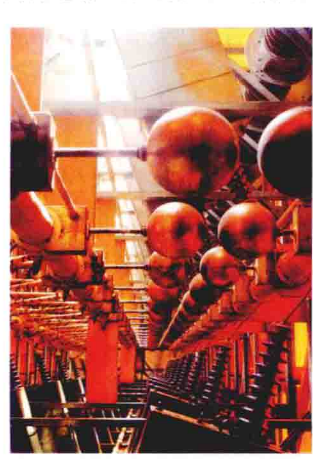


图 5 6000kV 冲击电压发生器

结构 用绝缘结构把多台电容器架设起来，使电容器之间和对地之间，保持必要的距离。多数冲击电压发生器安装在实验室内。特高参数的则安装在室外。为了限制电感数值，以避免波形振荡，要求结构设计得很紧凑。有的研究部门为生产很陡的冲击波，把整个发生器浸在绝缘油或压缩气体的绝缘容器内。图 5 和图 6 所示分别为 6MV 和 7.2MV 冲击电压发生器。



图 6 中国武汉交流特高压试验基地 7200kV 冲击电压发生器

chongji gaodianya celiang

冲击高电压测量 （measurement of high impulse voltage） 见高电压测量。

chongji jianliuji

冲击检流计 （ballistic galvanometer） 见检流计。

chongji xiangying

冲激响应 （impulse response） 单位冲激函数作用于线性电路或线性系统所产生的零状态响应，用 $h(t)$ 表示。冲激响应是电路在一种特殊激励下产生的零状态响应。

单位冲激函数 $\delta(t)$ 又称为狄拉克函数或 δ 函数。

定义单位脉冲函数 $p_\Delta(t)$ 为

$$p_\Delta(t)=\begin{cases}\dfrac{1}{\Delta}, 0<t<\Delta\\ 0, \text{其他}\end{cases}$$

即单位脉冲函数 $p_\Delta(t)$ 是起点为 $t=0$，宽度为 Δ，高度为 $1/\Delta$ 的一个矩形脉冲。不论正参量 Δ 为何值，在曲线 $p_\Delta(t)$ 下面的面积总为 1，见图 1。

图 1 单位脉冲函数

单位冲激函数 $\delta(t)$ 是单位脉冲函数 $p_\Delta(t)$ 在 $\Delta\to0$ 时的极限，见图 2。其定义为

$$\begin{cases}\delta(t)=0, t\neq0\\ \int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\mathrm{d}t=1\end{cases}$$

如图 2 所示，图中箭头旁的（1）表示单位冲激函数$\delta(t)$的强度是 1。单位冲激函数也可以利用三角形脉冲、双边指数脉冲、钟形脉冲、抽象信号等的极限获得。

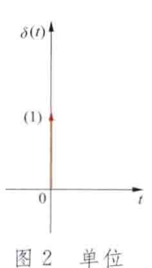


图 2 单位冲激函数

线性定常系统的网络函数 $H(s)$ 定义为系统响应的象函数 $R(s)$ 与激励象函数 $U_S(s)$ 的比，即 $H(s)=R(s)/U_S(s)$。当激励是单位冲激函数时，$U_S(s)=\mathscr{L}[\delta(t)]=$

1，此时网络函数 $H(s)=R(s)$。若用 $h(t)$ 表示系统的单位冲激响应，则取网络函数 $H(s)$ 的拉普拉斯反变换可求得系统的单位冲激响应，即 $h(t)=r(t)=\mathscr{L}^{-1}[H(s)]$。同一系统的网络函数 $H(s)$ 与单位冲激响应 $h(t)$ 是一对拉普拉斯变换对，它们是系统所固有的。

冲激响应示例　图 3 是电阻 R 和电容 C 串联接到电压源 $u_S(t)$ 的电路图。电源电压 $u_S(t)$ 是激励，电容电压 $u_C(t)$ 为响应。当 $u_S(t)=\delta(t)$ 时，电容电压 $u_C(t)$ 的零状态响应就是冲激响应，即

$$h(t)=u_C(t)=\frac{1}{RC}e^{-\frac{t}{RC}}\text{ ，}t\geqslant 0$$

冲激响应 $h(t)$ 的波形见图 4。

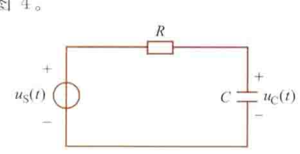


图 3　RC 串联电路图

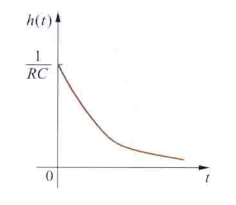


图 4　冲激响应 $h(t)$ 的波形

冲激响应的应用　见卷积。

chongqiguan

充气管　（gasfilled tube）

电特性基本上是由有意引进的气体或蒸气的电离作用所决定的一种电子器件，又名离子管。在充气管内，电子在电极间运动时与气体原子或分子碰撞，产生电离进而发生气体放电。充气管内放电形式取决于管子结构、气体种类、气压和外电路参数。人们利用各种放电形式的不同特性制造出一系列不同性能的充气管。充气管分为冷阴极放电管、热阴极放电管和汞弧整流器等。

冷阴极放电管　阴极发射电子是靠二次电子供给的，即由于放电使正离子与阴极相碰撞，产生二次电子。冷阴极放电管主要包括：稳压放电管、触发管、盖革—弥勒（GM）计数管和指示放电管，还有十进制计数放电管、光调制器、转换放电管等。此外，还有一种基于高气压气体放电原理的亚纳秒脉冲放电管。

（1）稳压放电管：在正常辉光放电区或电晕放电区内，当电流在一定范围内变化时，电极间的电压基本不变。辉光放电稳压管适用于低电压、较大电流；电晕放电稳压管适用于高电压、小电流（数百伏到 30kV，约 1mA）的情况。由它构成的直流稳压器，当输入电源电压或与稳压管并联的负载电流变化时，流过稳压管的电流产生相应的改变，从而使负载两端的电压基本保持不变。

（2）触发管：又称为冷阴极闸流管。它是利用加到触发极（启动极）的信号来控制放电的一种冷阴极充气管，分为辉光放电型、弧光放电型和高压火花放电型。辉光放电型触发管的电流一般为几十毫安，弧光放电型触发管的脉冲电流达几千安，高压火花放电型触发管脉冲电流可达几万安。

（3）盖革-弥勒（GM）计数管：这是放射性计数管。它由线性阳极和与阳极同轴的圆筒形阴极构成，是管内充有惰性气体和熄灭气体的二极管。每当射线进入管子时便产生电晕放电，但由于有熄灭气体（卤素气体等）放电很快停止，成为脉冲状放电，故能够进行计数。

（4）指示放电管：主要是利用氦气的辉光放电发出的明亮的橙色光显示数字或文字等。数码管中有 0 到 9 数字形状的细阴极线，并使之重叠，而在其对面有一个网状阳极。它与发光二极管和液晶显示器件等相比，成本较高，但可制成大型指示管，且色彩明亮醒目。

（5）亚纳秒脉冲放电管：基于高气压气体放电原理的充气二极管。主要用于产生高压快速电脉冲。脉冲的上升时间和宽度都在亚纳秒（10^{-10}s）范围之内，脉冲幅度可高达 1000～5000V，脉冲重复频率在几十至几千赫兹。在高电压技术、电磁导弹、探地雷达、电磁脉冲灭菌、电介质阻挡放电照相技术等方面得到了广泛的应用。

热阴极放电管　阴极发射电子是靠热电子发射来供给的，有热阴极充气二极管和闸流管之分。

（1）热阴极充气二极管：一种非自持弧光放电管，采用镍制阳极和钍钨阴极或金属氧化物阴极，管内充以惰性气体、氢气或汞。阴极靠热丝加热发射电子。当阳极加正向电压达到着火电压时，气体电离，产生弧光放电；当阳极电压变负时管子不能反向导电而熄灭。管子具有单向导电性，因此利用它进行整流。钨氩整流管（Tunga 管）是低压整流管（电压 200V 以下，电流达 15A），常用于蓄电池充电。高压整流放电管耐压可达 20kV，平均电流可达 15A，常用作通信装置电源。

（2）闸流管：具有控制特性的热阴极充气放电管。在阴极与阳极间有一个或多个栅极。管内充有汞蒸汽或氩、氙、氢等气体。闸流管主要用于可控整流、继电器控制等方面。虽然自 20 世纪 60 年代以后已逐渐被晶闸管所取代，但充氢闸流管在雷达装置及核聚变、激光、等离子体研究等方面仍有应用。

汞弧整流器　一种用石墨作阳极，水银池作阴极，能在汞蒸汽中产生自持弧光放电的充气管。电子发射来自阴极表面在强电场作用下的几个或一小片阴极辉点。汞弧整流器电压降低，能导通几万安的大电流，过载能力强，适用于大电流控制和整流，但体积大、使用不方便。近年来，已被半导体器件所取代。

chouxiang shuju leixing

抽象数据类型　（abstract data type）

与表示无关的数据类型。数据类型由一个对象集合（值集）和在该集合上定义的若干合法运算所组成的运算集合组成。抽象数据类型用数学方法定义对象集合和运算集合，仅通过运算的性质刻画数据对象，而独立于计算机中可能的表示方法，即不论其内部结构如何变化，只要数学特性不变，都不影响其外部的使用。其目的在于隐蔽运算实现的细节和内部数据结构，同时向用户提供该数据类型的完整信息。

抽象数据类型需要通过固有数据类型（高级编程语言中已实现的数据类型）来实现。对一个抽象数据类型进行定义时，必须给出它的名字及各运算的运算符名，即函数名，并且规定这些函数的参数性质。一旦定义了一个抽象数据类型及具体实现，程序设计中就可以像使用基本数据类型那样，十分方便地使用抽象数据类型。抽象数据类型的描述包括给出抽象数据类型的名称、数据的集合、数据之间的关系和操作的集合等方面的描述。抽象数据类型的设计者根据这些描述给出操作的具体实现，抽象数据类型的使用者依据这些描述使用抽象数据类型。

抽象数据类型能够从抽象的角度描述客观对象的性态，满足信息隐蔽、功能抽象、设计在前、方便验证等软件工程的要求。其理论对软件规约、正确性证明等均具有重要意义，对面向对象语言的发展有重要的影响。

chufaqi

触发器 （flip-flop） 具有记忆或存储 1 位二值信息的一种逻辑电路。它有两个稳定状态，可以存储 1 位二值代码或数码，是时序逻辑电路的基本单元。

基本特点 ①具有两个稳定状态，分别用来表示存储的二进制的 0 或 1。②在适当的输入和触发信号作用下，电路可从一种稳定状态转变为另一种稳定状态；当触发信号消失后，电路能够保持现有状态不变。

分类 依据逻辑功能、电路结构型式和工艺有三种分类方法。

（1）根据逻辑功能的不同，触发器可分为基本 RS 触发器、D 触发器、JK 触发器、T 触发器等。

（2）根据电路结构型式的不同，触发器可分为基本 RS 触发器、时钟 RS 触发器、主从触发器、边沿触发器等。有时还将它们再划分为电平触发型和边沿触发型两类。在边沿触发型触发器电路中，触发器的新状态仅仅取决于时钟信号动作沿到达时输入信号的状态；而在电平触发型触发器电路中，在时钟信号的整个有效电平作用时间里输入信号对触发器的新状态都将发生影响（这种触发器也称为锁存器）。

（3）根据采用工艺的不同，集成触发器可分成双极型触发器和场效应管触发器两大类型。

chuanbo changshu

传播常数 （propagation constant） 见传输线。

chuandi hanshu

传递函数 （transfer function） 初始条件为零时，线性定常系统输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比。传递函数是研究经典控制理论的主要工具之一。

设有一线性定常系统，其微分方程为

$$a_0\frac{d^n}{dt^n}y+a_1\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}y+\cdots+a_{n-1}\frac{dy}{dt}+a_ny$$
$$=b_0\frac{d^m}{dt^m}x+b_1\frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}}x+\cdots+b_{m-1}\frac{dx}{dt}+b_mx\,(n>m)$$

式中 $y=y(t)$ 为系统的输出量；$x=x(t)$ 为系统的输入量。初始条件为零时，对上式两端分别取拉普拉斯变换，可得

$$(a_0s^n+a_1s^{n-1}+\cdots+a_{n-1}s+a_n)Y(s)$$
$$=(b_0s^m+b_1s^{m-1}+\cdots+b_{m-1}s+b_m)X(s)$$

式中 $Y(s)$、$X(s)$ 分别是 $y(t)$、$x(t)$ 的象函数。将上式改写为

$$Y(s)=G(s)X(s)$$

式中 $G(s)=\dfrac{Y(s)}{X(s)}=\dfrac{b_0s^m+b_1s^{m-1}+\cdots+b_{m-1}s+b_m}{a_0s^n+a_1s^{n-1}+\cdots+a_{n-1}s+a_n}$。

可以看出，$X(s)$ 乘以 $G(s)$，就得 $Y(s)$，$G(s)$ 起着输入量到输出量的传递作用，因而称它为传递函数。传递函数分母多项式中 s 的最高阶数 n，就是输出量最高阶导数的阶数，这种系统就叫 n 阶系统。传递函数表述了系统本身的特性，它不随输入量的不同而变化。传递函数不表明系统的物理结构，许多物理性质不同的系统，可以有相同的传递函数。几种典型环节的传递函数列于下表中（见环节中的图1～图 5）。

几种典型环节的传递函数

环　节	方　　程	传递函数
比例环节	$y=Kx$	K
一阶惯性环节和比例环节	$T\frac{du_o}{dt}+u_o=Ku_i$	$\frac{K}{Ts+1}$
微分环节和比例环节	$u_o=KT\frac{du_i}{dt}$	KTs
积分环节和比例环节	$\theta=K\int u_a dt, x_o=K\int x_i dt$	$\frac{K}{s}$
二阶环节和比例环节	$T_1T_2\frac{d^2u_o}{dt^2}+T_1\frac{du_o}{dt}+u_o=Ku_i$	$\frac{K}{T_1T_2s^2+T_1s+1}$
纯滞后环节	$y(t)=x(t-\tau)$	$e^{-\tau s}$

无负载效应时串联系统的传递函数 若系统由两个元件或环节串联组成，元件之间无负载效应，则消去中间的输出量和输入量，便可得到系统的传递函数。例如，对于图 1（a）所示的系统，各元件的传递函数分别是

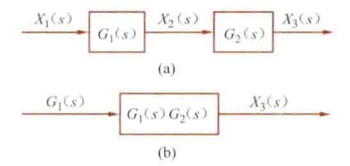


图 1 元件之间无负载效应的串联系统及其等效系统
（a）系统图；（b）图（a）的等效系统图

$$G_1(s)=X_2(s)/X_1(s),G_2(s)=X_3(s)/X_2(s)$$

若元件之间的负载效应可以忽略，则整个系统的传递函数为

$$G(s)=\frac{X_3(s)}{X_1(s)}=\frac{X_2(s)X_3(s)}{X_1(s)X_2(s)}=G_1(s)G_2(s)$$

如图 1（b）所示。

无负载效应时，传递函数分别为 $G_1(s)$,$G_2(s)$,$\cdots$，$G_n(s)$ 的 n 个元件串联组成的系统，传递函数为

$$G(s)=G_1(s)G_2(s)\cdots G_n(s)$$

有负载效应时串联系统的传递函数 如图 2 所示的两个 RC 电路串联构成的系统，第二级电路对第一级电路有负载效应，系统的传递函数不等于两元件传递函数 $1/(R_1C_1s+1)$ 和 $1/(R_2C_2s+1)$ 之乘积，而为

$$G(s)=\frac{E_o(s)}{E_i(s)}$$
$$=\frac{1}{R_1C_1R_2C_2s^2+(R_1C_1+R_2C_2+R_1C_2)s+1}$$

在元件之间引入隔离元件（例如隔离放大器）可以去掉负载效应，如图 3 所示的系统，其传递函数为

$$G(s)=\frac{E_o(s)}{E_i(s)}=\frac{K}{(R_1C_1s+1)(R_2C_2s+1)}$$

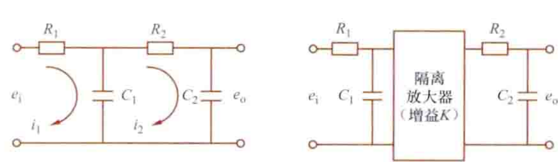


图 2 RC 电路　　图 3 有隔离放大器的两级 RC 电路

并联系统的传递函数 如图 4 所示，n 个元件的传递函

数分别为 $G_1(s), G_2(s), \cdots, G_n(s)$，整个系统的传递函数为

$$G(s)=G_1(s)+G_2(s)+\cdots+G_n(s)$$

零点和极点　系统的传递函数 $G(s)$ 是复变数 s 的函数，经整理，$G(s)$ 可写成如下的有理真分式形式

$$G(s)=\frac{K(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)}(n>m)$$

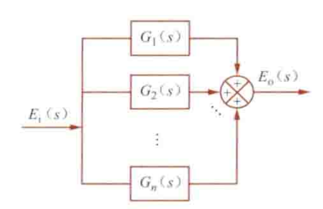


图4　n个元件并联构成的系统

式中 $z_1, z_2, \cdots, p_m$ 称为系统的零点，零点是 $G(s)$ 分子多项式等于零的根，在这些点上，$G(s)=0$（另有 $n-m$ 个开环零点在无穷远处）；$p_1, p_2, \cdots, p_n$ 称为系统的极点，极点是 $G(s)$ 分母多项式等于零的根，s 趋近于这些点时，$G(s)\to\infty$。零点和极点用于控制系统的分析和设计。

要区分清楚是闭环系统还是开环系统的零点和极点。

chuandi hanshu juzhen

传递函数矩阵　(transfer function matrix)　表示线性定常控制系统输入向量对状态向量、输入向量对输出向量传递关系的矩阵。用于多输入多输出控制系统的分析研究。

简单系统的传递函数矩阵　一控制系统的状态空间表达式如下

$$\left.\begin{aligned}\dot{x}&=Ax+Bu\\ \dot{y}&=Cx+Du\end{aligned}\right\}\text{简写为}(A、B、C、D) \tag{1}$$

式中 x 为 n 维状态向量；y 为 q 维输出向量；u 为 p 维输入向量；A 为 $n\times n$ 维系统矩阵；B 为 $n\times p$ 维输入矩阵；C 为 $q\times n$ 维输出矩阵；D 为 $q\times p$ 维前馈矩阵。

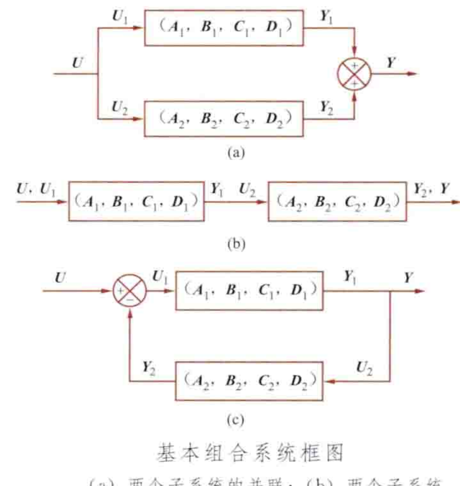
假定系统初始状态为 $\mathbf{0}$，其拉普拉斯变换后的表达式为

$$\left.\begin{aligned}X(s)&=(sI-A)^{-1}BU(s)\\ Y(s)&=[C(sI-A)^{-1}B+D]U(s)\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中 $(sI-A)^{-1}B$ 称为输入状态传递函数矩阵；$C(sI-A)^{-1}B+D$ 称为输入输出传递函数矩阵，简称传递函数矩阵，它是一个 $q\times p$ 维矩阵，它的每一个元素反映了某个输入变量对某个输出变量的传递函数。一个控制系统的传递函数矩阵是一定的，不因坐标变换而变化。

复杂系统的传递函数矩阵　实际的控制系统往往由多个子系统组合而成，或并联，或串联，或形成反馈连接，或是它们的组合。组合系统的输入输出传递函数矩阵可由各子系统的输入输出传递函数矩阵组合而成。图为基本组合系统的框图。图(a)示出两个子系统的并联，其输入输出传递函数矩阵 $W(s)=W_1(s)+W_2(s)$，式中 $W_1(s)$、$W_2(s)$ 分别为子系统 (A_1, B_1, C_1, D_1) 和 (A_2, B_2, C_2, D_2) 的输入输出传递函数矩阵。图(b)示出两个子系统的串联，其输入输出传递函数矩阵为 $W(s)=W_2(s)W_1(s)$。图(c)示出由反馈子系统构成的组合系统，其输入输出传递函数矩阵为 $W(s)=W_1(s)[I+W_2(s)W_1(s)]^{-1}$ 或 $W(s)=[I+W_1(s)W_2(s)]^{-1}W_1(s)$。

当控制系统维数不高时，可直接由 $\frac{\text{adj}(sI-A)}{|sI-A|}$ 求得 $(sI-A)^{-1}$，其中 $|sI-A|$ 为 $(sI-A)$ 矩阵的行列式，$\text{adj}(sI-A)$ 为 $(sI-A)$ 矩阵的伴随矩阵。当控制系统维数较高时，这样的方法计算过程太复杂，可用其他更简便的方法。



基本组合系统框图

(a) 两个子系统的并联；(b) 两个子系统的串联；(c) 由反馈子系统构成

对许多实际系统而言，D 矩阵往往是 $\mathbf{0}$ 矩阵，$|sI-A|$ 的根为系统的极点，$C[\text{adj}(sI-A)]B$ 中各元素多项式的根为系统的零点。存在零点、极点相消的情况下，传递函数矩阵就不能完全描述系统的运动规律及性能，只能反映系统完全可控且完全可观测部分的情况。

chuanshuxian

传输线　(transmission lines)　连接两个或多个终端用以传输电能或电信号的导体系统。连接发电厂、变电站及负载的是电力传输线，连接电话用户和电话交换机的是电话传输线等。在电工技术中，传输线常指其长度与其所传输的交变电压、电流的波长相比不是很小的传输系统。在这样的传输线上，电压、电流不仅是时间的函数，还是空间坐标的函数。它们在传输线上的分布，明显地表现出行波现象具有的特征。分析这种电路时，必须考虑电路元件参数的分布性，作为分布参数电路来处理。例如，中国电力系统的频率为50Hz，架空输电线上的波长约为6000km，所以只有长度为数百公里的输电线才被视为传输线。对于其长度远较其工作频率下的电磁波长短的传输系统，往往不作为传输线看待。但在暂态过程中，研究急剧变化的电磁过程，却有必要将远比上述长度短的输电线作为传输线考虑。

传输线分类　按照其中导体结构和其周围电磁场的特征，传输线可分为架空传输线、同轴传输线、电缆等。传输线的横向尺寸远小于其工作频率下的波长，都以横电磁模(TEM)方式传输电能或信号。微波电子技术中用的波导是用来约束或引导电磁波的结构，是一种特殊的传输线，用于传输厘米波和毫米波，它是以横电模(TE)、横磁模(TM)等方式工作的。图1中是几种常见传输线的横截面示意图。

架空传输线　以架空方式装设的传输线。常由两根或多根导线组成。架空传输线建造费用低，维护方便，在低频和中频下损耗低。但它存在相邻导线间的电磁耦合，从而造成电磁干扰。绝大多数电

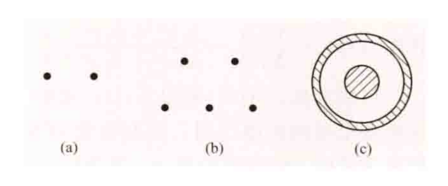


图1　常见传输线的横截面

(a) 平行双导线；(b) 平行多导线；(c) 同轴传输线

力传输线都是架空线。

同轴传输线　有两个同轴的柱形导体，如图1（c）所示。外导体常用带状导体或编织导体制成，内导体可以是单股或多股导线，两导体间有绝缘物。这种结构可以防止传输线的辐射和外界电磁干扰。同轴传输线在高频技术如无线电、雷达、电视中有广泛的应用。

电缆　两根或多根导线，用绝缘材料包裹后包在圆柱形导电外皮中的传输线。导体外皮有电磁屏蔽和机械保护作用。城市中多用电缆作为电力传输线。

均匀传输线方程　凡是其电路参数沿线路不变的传输线称为均匀传输线，否则称为不均匀传输线。均匀传输线可以用图2中的双导线模型表示和分析。此模型中的参数 R_0、L_0 分别是单位长度的线路（来线和回线）电阻、电感；G_0、C_0 分别是单位长度线路两线间的电导、电容。它们是不变的常数。线上电压 $u(x,t)$ 和电流 $i(x,t)$ 所满足的偏微分方程是

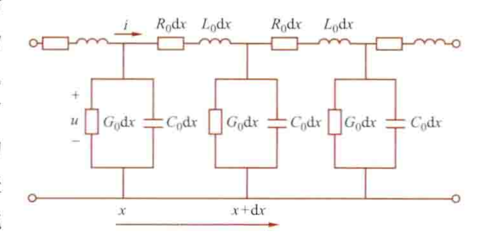


图2　双导线传输线的电路模型

$$\left.\begin{aligned}-\frac{\partial u}{\partial x}&=R_0 i+L_0\frac{\partial i}{\partial t}\\-\frac{\partial i}{\partial x}&=G_0 u+C_0\frac{\partial u}{\partial t}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中 x 是长度坐标，t 是时间。这是均匀传输线方程，又称电报方程。

在正弦稳态下，线上电压相量 $\underline{U}(x)$、电流相量 $\underline{I}(x)$ 满足如下方程

$$\left.\begin{aligned}-\frac{\mathrm{d}\underline{U}}{\mathrm{d}x}&=\underline{Z}_0\underline{I}\\-\frac{\mathrm{d}\underline{I}}{\mathrm{d}x}&=\underline{Y}_0\underline{U}\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中 $\underline{Z}_0=R_0+\mathrm{j}\omega L_0$，$\underline{Y}_0=G_0+\mathrm{j}\omega C_0$，$\omega=2\pi f$，$f$ 是频率。在正弦稳态下，上式的解就是线上电压相量 $\underline{U}(x)$ 和电流相量 $\underline{I}(x)$ 的沿线分布

$$\left.\begin{aligned}\underline{U}(x)&=\underline{U}_{\mathrm{i}}\mathrm{e}^{-\gamma x}+\underline{U}_{\mathrm{r}}\mathrm{e}^{\gamma x}\\\underline{I}(x)&=\frac{\underline{U}_{\mathrm{i}}}{\underline{Z}_{\mathrm{C}}}\mathrm{e}^{-\gamma x}-\frac{\underline{U}_{\mathrm{r}}}{\underline{Z}_{\mathrm{C}}}\mathrm{e}^{\gamma x}\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

式中 $\underline{Z}_{\mathrm{C}}=\sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$，$\gamma=\sqrt{\underline{Z}_0\underline{Y}_0}$，$\underline{U}_{\mathrm{i}}=\frac{1}{2}(\underline{U}_1+\underline{Z}_{\mathrm{C}}\underline{I}_1)$，$\underline{U}_{\mathrm{r}}=\frac{1}{2}(\underline{U}_1-\underline{Z}_{\mathrm{C}}\underline{I}_1)$，其中 $\underline{U}_1$、$\underline{I}_1$ 分别代表 $x=0$ 处的电压和电流。

均匀传输线上的波　分作入射波和反射波。式（3）中，$\underline{U}_{\mathrm{i}}\mathrm{e}^{-\gamma x}$、$\frac{\underline{U}_{\mathrm{i}}}{\underline{Z}_{\mathrm{C}}}\mathrm{e}^{-\gamma x}$ 分别是正弦稳态下电压入射波相量和电流入射波相量；$\underline{U}_{\mathrm{r}}\mathrm{e}^{\gamma x}$、$\frac{\underline{U}_{\mathrm{r}}}{\underline{Z}_{\mathrm{C}}}\mathrm{e}^{\gamma x}$ 分别是电压反射波相量和电流反射波相量。

传播常数　复数 $\gamma=\alpha+\mathrm{j}\beta$ 称为传播常数。它的实部 α 称衰减常数，其值为单位长度传输线上波的衰减量，虚部 β 称为相位常数，其值为单位长度传输线上波的相位移。指定某一时刻 t_1，此时电压入射波的瞬时值沿 x 的分布见图3中实线，它是一条振幅沿 x 增加方向衰减的正弦曲线。在这条实线上，x_{a} 点处和 x_{b} 点处入射波的相位之差是 2π；由 x_{a} 到 x_{b} 的距离记作 λ，称作入射波的波长：$\lambda=2\pi/\beta$。相位常数 β 越大，波长 λ 越短。电压入射波包络线的方程是 $\sqrt{2}|\underline{U}_{\mathrm{i}}|\mathrm{e}^{-\alpha x}$，图中用点划线表示。衰减常数 α 越大，电压振幅沿线衰减越快。在另一时刻 t_2（$t_2=t_1+\Delta t>t_1$），电压入射波瞬时值的分布用图3中虚线表示。图中，t_1 时刻的 x_{a} 点（在实线上）和 t_2 时刻的 x'_{a} 点（在虚线上）处的电压入射波有相同的相位，它们是等相位点。等相位点之间的距离 $\Delta x=x'_{\mathrm{a}}-x_{\mathrm{a}}=x'_{\mathrm{b}}-x_{\mathrm{b}}$，定义相位速度 v 为

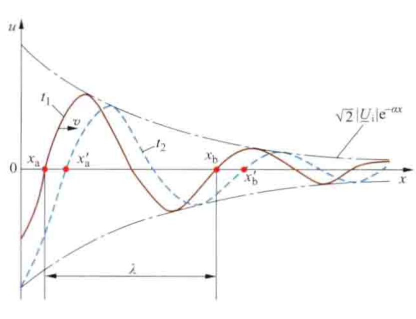


图3　电压入射波瞬时值

$$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{\omega}{\beta}=f\lambda$$

它就是等相位点前进的速度。对于架空线，相位速度 v 约等于真空中的光速，$v\approx3\times10^8\,\mathrm{m/s}$，若频率 $f=50\mathrm{Hz}$，则波长 λ 约为 6000km。在某一时刻 t_3 电压反射波瞬时值的分布见图4，反射波以相位速度 v 沿反方向进行。

特性阻抗　式（3）中的 $\underline{Z}_{\mathrm{C}}$ 称为特性阻抗，它是线上电压行波与其同向行进的电流行波相量值之比。如果传输线的损耗很小，即 $R_0\ll\omega L_0$，$G_0\ll\omega C_0$，而忽略其作用，特性阻抗即等于 $\underline{Z}_{\mathrm{C}}=\sqrt{L_0/C_0}$ 几乎为一实常数值。应用于高频下的传输线常以其 $\underline{Z}_{\mathrm{C}}$ 表示馈线的特性，例如配合电视天线用的有 300Ω、75Ω 的馈线等。

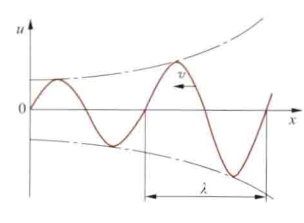


图4　电压反射波瞬时值

无畸变线　通信用的传输线常需要尽量避免传输信号波形发生畸变。信号畸变有两种：一种是由于衰减随频率变化而产生的幅度畸变；另一种是由于相位速度 v 随频率变化而造成的相位畸变。如果传输线的参数满足 $R_0/G_0=L_0/C_0$，便能实现无畸变传输。此时传播常数

$$\gamma=\alpha+\mathrm{j}\beta=\sqrt{\frac{R_0}{G_0}}\,(G_0+\mathrm{j}\omega C_0)$$

在衰减常数 α 与频率无关的情况下，就不会有振幅畸变；在相位常数 β 与频率成正比时，相位速度与频率无关，就不会有相位畸变。

反射系数　终端接负载阻抗 $\underline{Z}_{\mathrm{L}}$ 的传输线，终端处反射波电压（电流）相量与入射波电压（电流）相量之比是

$$\rho=\frac{\underline{Z}_{\mathrm{L}}-\underline{Z}_{\mathrm{C}}}{\underline{Z}_{\mathrm{L}}+\underline{Z}_{\mathrm{C}}}$$

称为反射系数。如果 $\underline{Z}_{\mathrm{L}}=\underline{Z}_{\mathrm{C}}$，反射系数为零，线上就没有电压、电流的反射波。在这一条件下，就说传输线是匹配的。

自然功率　传输线在终端所接负载阻抗等于特性阻抗时

传输的功率叫做它的自然功率。在忽略线路损耗的情形下，自然功率

$$P_n = |U_N^2 / \underline{Z}_C|$$

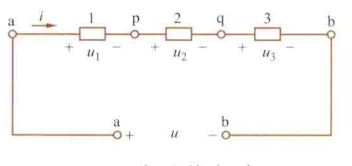
式中 U_N 是传输线的电压。电力传输线的经济负载一般在1～1.5倍自然功率的范围内，过大的负载将使电能损耗增加。

暂态响应 传输线在暂态下的响应由方程（1）在暂态下的解表示。其中的典型现象是传输线上的任何电磁扰动都以电磁波的形式沿线传播，因而有着电流、电压传播的延迟。例如在架空线上某处发生雷击，它的影响将以光速向线路两端传播，侵入两端的电力设备。如不加以防护，将对设备造成损害。

chuanlian

串联 (series connection)

将两个或两个以上元件排成一串，每个元件的首端和前一个元件的尾端连成一个节点，而且这个节点不再同其他节点连接的连接方式。图示三个元件串联，元件3的首端和元件2的尾端连成节点q；元件2的首端和元件1的尾端连成节点p。元件1的首端a和元件3的尾端b则分别和电路的其他节点连接。



三个元件串联

串联电路的特点 ①流经各串联元件中的电流是同一个电流。②元件串联后的总电压是所有元件的端电压之和。图示电路中，u 是总电压，u_1、u_2、u_3 分别是元件1、2、3的电压，$u=u_1+u_2+u_3$。③若干个电阻串联时，元件串联后的总电阻是所有串联电阻的电阻之和。设图中元件都是电阻，电阻1、2、3的电阻分别是 R_1、R_2、R_3。总电阻 $R=R_1+R_2+R_3$，从而 $u=Ri$。式中 u 是总电压；i 是电流。

实例 五台相同的静电电容串联后接到电压是 $10/\sqrt{3}$kV 的电网上，每台电容的电压是 $10/\sqrt{3}$kV 的1/5即1.15kV。

chuanlian wenya dianlu

串联稳压电路 (series voltage stabilizing circuit)

调整管和负载电阻串联的使输出电压值近于恒定的稳压电路。

串联稳压电路的框图如图1所示。若将整流滤波电路输出的未稳直流电源 U_I 看作整个放大器的电源，而把基准电压看作输入电压 U_{ref}，则此电路就是电压串联负反馈电路（见反馈放大电路）。在调整管工作于线性放大区时，其输出电压为 $U_L=U_{ref}/F_u$，式中 F_u 为反馈系数。当基准电压 U_{ref} 值取定后，改变 F_u 值，就能改变 U_L 值。据此可做成手动控制或程序控制的可调电源。

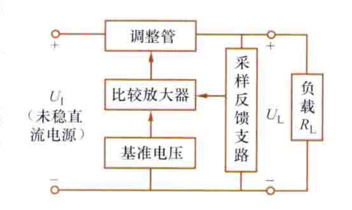


图1 串联稳压电路方框图

电路的稳压作用如下：采样反馈支路将输出电压 U_L 取出一部分反馈到比较放大器与基准电压进行比较。当输出电压 U_L 由于输入电压 U_I 变化或负载电流 I_L 变化而发生变化时，比较放大器将 U_L 的变化信号加以放大并送给调整管，使调整管的管压降发生相反的变化以抵消输出电压的改变，从而维持输出电压的恒定。

图1框图中的比较放大器可以采用晶体管或场效应管的差动放大电路构成，也可以采用集成运算放大器构成。用运算放大器构成的串联稳压电路如图2所示。此稳压电路的反馈系数 F_u 等于 $(R_2+R_3)/(R_1+R_2+R_3)$。

在串联稳压电路中，要保证调整管始终工作于放大区而不进入饱和区，所以正常工作时，调整管上管压降较大，从而导致功率转换效率下降（其效率为30%～35%），尤其是在要求输出低电压大电流，或要求输出电压可调范围较宽时，其效率就更低。在此情况下，串联稳压电路常采用带辅助电源或分段调节式稳压电路来提高效率，并使输出电压最小值可以调到接近于零伏。

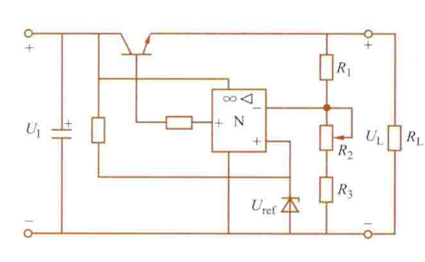


图2 运算放大器串联稳压电路

在串联稳压电路中，由于负载和调整管是串联的，当突然发生过载或短路时，将导致调整管损坏。调整管的损坏是在非常短的时间内发生的，一般的热熔熔丝由于动作较慢，起不到保护作用，所以实用的串联稳压电路通常都加有限流型或截流型的过流保护电路。

串联稳压电路的特点是：稳压精度高、输出电阻低、电路简单、带负载能力强。

chuanlian xiezhen zhuangzhi

串联谐振装置 (series resonant equipment)

利用电容、电感串联谐振的原理产生交流高电压的试验装置。应用高电压试验变压器为大电容量的试品（如长电缆、六氟化硫管道、电容器以及容量很大的发电机）进行耐压试验时，常发生满足不了试验容量的问题，且电力系统内进行上述试品的现场耐压试验时，采用庞大的试验变压器作为电源，运输也很不方便，为此有时改用串联谐振装置取代高压试验变压器。

串联谐振装置的原理接线如图1所示，其中T为供电变压器；L 是调谐用可变电感；C 为试品、分压器等的总电容；R 代表回路中实际存在的引线及调谐电感固有的电阻，也代表了高压导线的电晕损耗及试品介质损耗的等值电阻，有时也包括专门接入的调整电阻。工作时调整电感 L 的大小，使之与电容 C 在工频之下发生串联谐振。谐振的条件是 $\omega L=1/(\omega C)$，$\omega=2\pi f$，f 为50Hz或邻近值。若 U_s 为试验时的高压侧电源电压，则谐振状态下电流可达到 $I_M=U_s/R$。定义品质因数 $Q=\omega L/R$（一般 $Q=20\sim80$），于是 $U_C=U_L=\omega L I_M=QU_s$，所以电源变压器所需的电压值及容量均为试

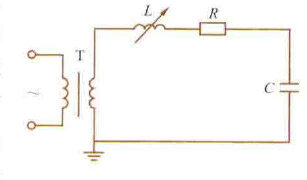


图1 串联谐振装置原理图

验所需值的 1/Q。图 2 所示为调感式串联谐振装置的一种实际连接方式。

图 1 及图 2 说明了调感式串联谐振装置的基本原理，实际上也可用调容式或电源调频式等调谐方式。调频式串联谐振装置，其频率在 45～300Hz 的范围内调节，特别适用于现场气体绝缘金属封闭开关设备的耐压试验。这种方式有利于 Q 值的提高，并使装置重量减轻。

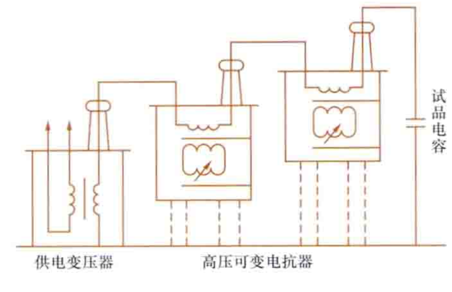


图 2 调感式串联谐振装置的串级连接方式

串联谐振装置的优点是：整个装置为可拆型，比高压试验变压器轻便；输出波形好；试品耐压击穿后，由于失谐，电弧即刻熄灭，不易重复击穿，可使试品的烧伤点不大。其缺点是不能用来进行湿闪和污闪试验。

中国已研制出调频、调感和调容等方式的高压串联谐振装置，技术性能良好，其中包括 2400kV、8A 的高参数试验装置。

cibiaowei

磁标位 (magnetic scalar potential) 无电流分布的单连通区域中，描述恒定磁场的辅助标量位函数，它的负梯度等于磁场强度。如果一个三维区域中的任何闭曲线可张成一个不离开该区域的曲面，这个三维区域就是单连通区域。磁标位 φ_m 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 的关系如下

$$\boldsymbol{H}=-\nabla\varphi_m$$

区域中 a、b 两点的磁标位 φ_{ma} 和 φ_{mb} 之差即磁位差，等于磁场强度从点 a 到点 b 的线积分

$$\varphi_{ma}-\varphi_{mb}=\int_a^b\boldsymbol{H}\cdot d\boldsymbol{l}$$

积分路径规定在单连通区域内，磁位差与积分路径无关。常指定区域中某一点的磁标位之值为零，该点称为参考点。

磁标位的方程　对于真空或充满着同一种线性、各向同性磁介质的无电流分布的单连通区域，磁标位满足拉普拉斯方程，即

$$\nabla^2\varphi_m=0$$

利用已知区域的磁场边界条件解此方程，可求出区域中各处的磁标位。静电场中的电位也满足拉普拉斯方程。因此，若静电场和恒定磁场问题有几何相似的区域，以及相类似的边界条件，则用类比的方法，可直接由静电场问题的解得出磁场问题的解。

等磁标位面　为了形象地描绘磁场，在无电流的单连通区域内，可画出与磁场强度线正交的等磁标位面族。如果规定相邻两个等磁标位面之间的磁位差为某一常量，则等磁标位面密度大的地方，磁场强度大，反之磁场强度小。

设区域中既有铁磁介质又有非铁磁介质。相对于非铁磁介质中的磁场强度来说，铁磁介质中的磁场强度值通常很小，常可忽略，从而铁磁介质的边界面可以认为是等磁标位面。形象地说，位于边界面上，在非铁磁介质一侧的磁场强度线，处处垂直于该表面。利用这一性质，可以简化非铁磁介质中的磁场计算。

cibuchang cailiao

磁补偿材料 (magnetic compensation materials) 补偿因温度变化而引起的磁路磁通变化的材料。含有永久磁铁的磁路，气隙磁通常随温度而变化，精密仪表需进行温度补偿，即磁补偿。常用的磁补偿合金有 Ni－Fe、Ni－Cu 和Ni－Fe－Cr 等。仪表的使用温度一般为室温左右。磁补偿材料的居里温度就在室温附近。因此，当温度升高时，磁导率下降。为了得到良好的补偿，应选用磁导率与温度呈线性关系的区域。不同的磁补偿合金有不同的线性区，分别适用于不同的温度范围。在 20～80℃ 范围内选用 31：69的Ni－Fe合金，在 －20～40℃ 范围内选用 30：70 的 Ni－Fe合金。在0～－40℃ 范围内选用掺 Cr 的 Ni－Fe 合金。当 Ni、Fe、Cr 的比例为 31：61：8 时，在上述磁导率与温度呈线性关系的温度范围内使用，该磁补偿合金的磁导率基本上随温度升高而线性地下降，可以用来设计出良好的磁补偿分路。

cichang

磁场 (magnetic field) 存在于载流导体、永久磁体、运动电荷等周围的，以磁通密度表征的一种特殊形式的物质。磁场的物质性，可由它的如下许多特性显示出来：磁场具有能量；磁场对运动电荷、载流导体有作用力；导体在磁场中运动或处在时变磁场中都将在其中引起感应电动势，发电机、变压器就是根据这一原理制成的；在磁场的作用下，磁致伸缩材料会发生变形，呈现磁致伸缩现象；将载流导体置于磁场中，导体的横向两侧会出现电位差，即产生霍耳效应；磁场可使载流导体或半导体的电阻发生变化，即产生磁致电阻效应，等等。描述磁场的基本物理量是磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 和辅助量磁场强度 $\boldsymbol{H}$。

恒定磁场和时变磁场　在空间某区域内，若各处的磁通密度的量值和方向都不随时间变化，该区域中的磁场称为恒定磁场，否则称为时变磁场。时变磁场总是和时变电场相关联，以电磁波的形式存在。研究某一区域中的时变磁场时，若电磁波的波长远大于区域的线度，则可忽略位移电流产生的磁场，这种时变磁场称为似稳磁场。大多数电力设备中的时变磁场可以认为是似稳磁场。

均匀磁场和不均匀磁场　任何时刻，若空间某区域内各处的磁通密度的量值和方向都相同，则称区域中的磁场为均匀磁场，否则称为不均匀磁场。

介质的磁化　位于磁场中的介质会产生磁化。为宏观描述介质的磁化状态及其对外磁场的影响，引入了磁场强度这一概念。磁通密度和磁场强度的关系，常用磁化曲线表示。电气工程中，在许多场合下，只考虑铁磁材料的磁化；非铁磁材料的磁化弱，一般不予考虑，即认为这种材料的磁导率和真空磁导率相同。

磁场的基本规律　磁场具有如下基本规律。

磁通连续性　穿过任何闭合面的磁通量等于零（见磁通量）。

磁场强度的环路积分　磁场强度沿闭合路径的线积分，

等于该闭合路径包围的全电流（见磁场强度）。

磁场的能量密度　在线性介质中，磁场能量密度（单位体积内的磁场能量）等于 $(\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{H})/2$。

介质分界面处磁场满足的条件　在介质1和介质2的分界面上有：①介质1、2的磁通密度的法向分量 B_{1n}、B_{2n} 相等，即 $B_{1n}=B_{2n}$；②介质1、2的磁场强度的切向分量 H_{1t} 和 H_{2t} 之差，等于分界面上的面电流密度 J_S（J_S 的方向垂直于 H_{1t} 和 H_{2t}），即 $H_{1t}-H_{2t}=J_S$。不存在面电流时，H_{1t} 和 H_{2t} 相等。

cichang qiangdu

磁场强度

（magnetic intensity）　由磁通密度和磁化强度线性组合组成的物理量。磁场强度用符号 $\boldsymbol{H}$ 表示，其表达式为

$$\boldsymbol{H}=\frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0}-\boldsymbol{M}$$

式中 $\boldsymbol{B}$ 是磁通密度；$\boldsymbol{M}$ 是磁化强度；μ_0 是真空磁导率。在各向同性线性介质中，磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 成正比，$\boldsymbol{M}=\chi_m\boldsymbol{H}$，$\chi_m$ 是磁化率。上式可改写成

$$\boldsymbol{B}=(1+\chi_m)\mu_0\boldsymbol{H}=\mu_r\mu_0\boldsymbol{H}=\mu\boldsymbol{H}$$

式中 $\mu=\mu_r\mu_0$ 称为介质的磁导率；$\mu_r=1+\chi_m$ 称为介质的相对磁导率，为一无量纲的纯数。真空中无磁化现象，$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{0}$，此时 $\boldsymbol{B}=\mu_0\boldsymbol{H}$。对非线性的各向同性磁介质，它的磁导率 μ 不是常量，而是磁通密度的函数。在国际单位制（SI）中，磁场强度的单位是安［培］每米（A/m）。

安培环路定律　真空中，磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 沿任一闭合曲线 l 的线积分，正比于穿过此曲线所围曲面 S 的总电流 I

$$\oint_l \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=\mu_0 I$$

当穿过曲面 S 的电流 I 的方向与线积分所绕行的方向成右手螺旋关系时，I 值为正，反之 I 值为负，如图1所示，$I=I_1-I_2+I_3$。

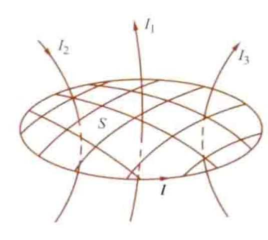


图1　穿过面 S 的电流

有磁介质时的安培环路定律　磁介质的存在影响磁场。根据解释物质磁化的分子电流理论，在磁场作用下，物体内部分子电流的定向排列，使物体磁化。这时，有分子电流 I_m 穿越上述 S 面，而且 I_m 之值等于磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 沿闭合曲线 l 的线积分，即

$$\oint_l \boldsymbol{M}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=I_m$$

因此，存在磁介质时，磁场可看作由导线中的电流和磁介质内的分子电流共同在真空中建立起来的，因此

$$\oint_l \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=\mu_0 I+\mu_0 I_m=\mu_0 I+\mu_0\oint_l \boldsymbol{M}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

于是有

$$\oint_l\left(\frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0}-\boldsymbol{M}\right)\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=I$$

引入磁场强度 $\boldsymbol{H}$，可将上式写成如下形式

$$\oint_l \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=I$$

相应的微分表达式为

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J}$$

式中 $\boldsymbol{J}$ 是电流密度。以上两式分别是安培环路定律的积分形式和微分形式，后一形式表明磁场是有旋场。

全电流定律　时变场中，全电流（传导电流、运流电流和位移电流的总称）与它所建立磁场之间的规律，由全电流定律描述。J. C. 麦克斯韦（J. C. Maxwell，1831—1879）将时变电场所形成的位移电流引入安培环路定律。令 I 代表穿过曲面 S 的传导电流和运流电流（见电流），I_d 代表穿过曲面 S 的位移电流，则全电流定律可表示为

$$\oint_l \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=I+I_d$$

其相应的微分表达式为

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J}+\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}$$

式中 $\boldsymbol{D}$ 是电通密度；$\partial\boldsymbol{D}/\partial t$ 是位移电流密度。

磁场强度线　磁场强度线是一条曲线，它上面任意点的切线方向是该点磁场强度的方向。磁场强度线也叫 H 线。作图时，常遵循磁场强度线分布的密度正比于磁场强度量值的原则。图2示出在一个由铁磁材料制成的含气隙磁路中磁场强度线和磁场线（见磁通密度）的图形，后者是闭合曲线。在气隙中，两者的分布相同；在铁芯中，磁场强度 H 的数值很小，用一根磁场强度线表示。

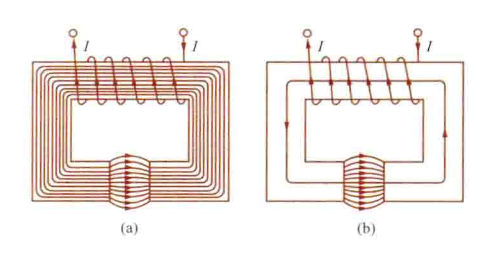


图2　磁场线和磁场强度线的图形

（a）B 线；（b）H 线

cichou

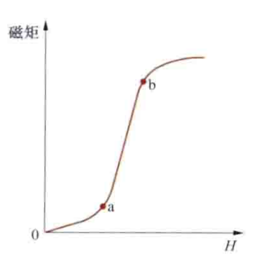
磁畴

（magnetic domain）　在居里温度以下，且无外磁场的情况下，铁磁质中的电子自旋磁矩在小范围内“自发化”排列起来，形成的一个小小的“自发磁化区”。

每一磁畴有一合成磁矩，相当于一块微小的永久磁铁。在邻近磁畴之间、厚度为晶胞的许多倍的边界区域称为畴壁。在这个区域内磁矩的取向从一个磁畴中的方向陆续转变为相邻磁畴中的方向。磁畴的大小并不固定，随外磁场的强弱而变化。磁畴的方向与外磁场情况及热运动有关。

铁磁体在外磁场作用下的磁化通常称为技术磁化，以区别于磁畴内部的自发磁化。技术磁化过程大致可分为以下两个阶段：

（1）畴壁移动：无外磁场时由于各磁畴取向混乱，对外不呈现磁性。随着外磁场的增强，磁矩和外磁场方向一致的磁畴逐渐扩大，相反方向的磁畴逐渐缩小，表现为畴壁的移动，其结果是产生了与外磁场同方向的合成磁矩。在初始磁化曲线（见图）上从原点0经附点a，直到膝点b，均属于畴壁移动所导致的磁化过程。但在0a段，由于外磁场较弱，如撤销外磁场，磁畴又会恢复原状，称为可逆畴壁移动；在ab段则出现不可逆畴壁移动，而且移动幅度较



初始磁化曲线图

大，此时若撤销外磁场，将不再沿 ba 曲线下降，即出现磁滞现象（见磁滞回线）。畴壁移动是铁磁体磁化的第一种机制。

（2）磁畴转动：磁化达到 b 点以上时，外磁场已足够强，出现磁畴转动，即磁矩方向与外磁场不一致的磁畴转向外磁场方向，继续增强外磁场，将导致所有磁畴磁矩方向完全转向外磁场方向，此时达到技术磁化饱和。磁畴转动是铁磁体磁化的第二种机制。

cidai cunchuqi

磁带存储器 （magnetic tape storage） 利用数字磁记录技术，通过磁头在纵向稳速传动的带状磁性媒体表面进行数据记录的顺序存取存储装置。在计算机系统中是可用于存放程序、数据、中间结果和最后需要保存的数据资料的外存储器。

结构和特点 磁带存储器由磁带、磁带驱动器（又称磁带机）和磁带控制器组成：①磁带。存放数据的带状媒体，在塑料带基的带面上涂有磁层，利用磁层被磁化后的剩磁来保存数据。磁带的结构有盘卷式和盒式两类。按磁带宽度可分为 0.5、0.25 英寸和 0.15 英寸三种。②磁带驱动器。包括磁头、走带机构和电子线路。磁头是电磁转换的部件。走带机构又由拖带、导带和缓冲装置组成，拖带装置是走带的动力；导带装置控制走带时的导向；缓冲装置用来使磁带以恒速恒张力地通过磁头。电子线路包括伺服和读写电路。伺服电路根据命令控制伺服电机拖动磁带运动。写电路用来把数据按规定的记录方式转换成磁信号。读电路把磁头读出信号恢复成写入前的数据。③磁带控制器。控制计算机与磁带机之间传递数据、命令和状态。它包括格式器和适配器两部分，通常这两部分分别安放在磁带机和计算机主机箱内。

主要技术指标 记录方式、记录密度、走带速度、每盘磁带的存储容量以及数据传输率等。

主要特点 ①信息能长期保存，不易丢失，可靠性高；②存储容量大，媒体占用空间小，便于存放；③由于磁带采用平涂工艺，成本低；④磁带存储技术有严格的国际标准，互换性好。

磁带存储技术于 20 世纪 50 年代初问世，70 年代前主要发展起停式磁带机；80 年代初开始应用流式磁带机，并正在逐步取代原有的起停式磁带机；90 年代后，随着微型计算机的发展，盒带存储设备也得到了应用。磁带存储器是硬盘存储器的理想后援设备。

cidao

磁导 （magnetic conductance） 见磁阻。

cidaoji

磁导计 （permeameter） 磁化开磁路（不闭合）铁磁材料试样的装置。配合其他仪器，用于对铁磁材料特性的测量。具体有中场磁导计和强场磁导计两种。

中场磁导计 用于磁化开磁路软磁材料试样，又称软磁磁导计，其原理结构见图 1。被测软磁材料试样加在两正对的 U 形磁轭之间，并穿过均匀缠绕的磁化线圈。两磁轭均由硅钢片叠制成。用它代替爱泼斯坦方圈测量硅钢片的磁特性和铁损，无需对被测硅钢片做剪裁，既节省试样材料，且被测试样的装入和取出均很方便。

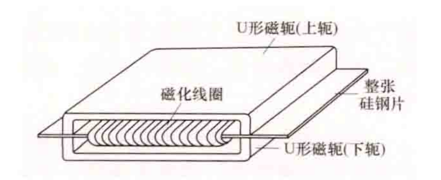


图 1 中场磁导计的原理结构

强场磁导计 用于磁化永磁材料即硬磁材料试样，又称永磁磁导计。它由磁极、磁轭、磁化线圈等构成，见图 2。被测材料试样夹在可动磁极与固定磁极之间。为使磁化磁场集中在被测材料试样上，必须使消耗在磁轭上的磁化安匝数尽可能小，故磁轭通常采用高磁导率材料制作，且截面较大。磁化线圈由直流电源供电，其容量要能产生足够大的饱和磁场强度 H_m。H_m 一般取被测硬磁材料内禀矫顽力 H_{cJ} 的 3～5 倍，且电源电压和频率的稳定度在 1min 内的变化应不超过 0.1%。图 3 和图 4 所示为 A 类磁导计和 B 类磁导计的实物图。

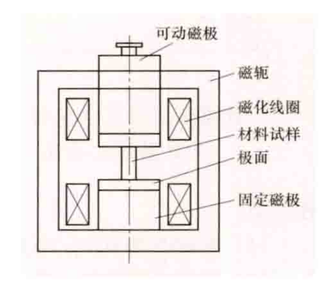
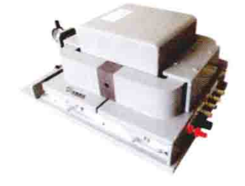
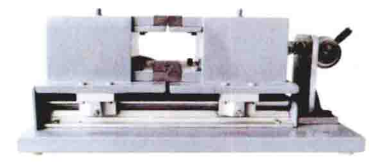


图 2 强场磁导计的原理结构


图 3 A 类磁导计


图 4 B 类磁导计

cidaolü

磁导率 （permeability） 描述物质磁性的一种物理量，是物质中某点的磁通密度 B 与该点磁场强度 H 之比，用 μ 表示：$\mu=B/H$。磁导率的单位为 T·m/A 或 H/m。在实际中也常使用相对磁导率 μ_r，其定义为磁体的磁导率 μ 与真空中磁导率 μ_0 之比，即 $\mu_r=\mu/\mu_0$，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\,\mathrm{T\cdot m\cdot A^{-1}}$。

为测定磁导率，通常把待测材料做成实心镯环状样品，上面均匀地绕满线圈，形成由待测材料为芯的环状线圈。当线圈中通以电流 I 时，可由线圈匝数 N 及电流 I 算出样品中磁化场的磁场强度 H，与此同时，通过绕在环上的二次线圈和与其相连的冲击检流计测出样品中的磁通密度 B。改变电流 I，测出相应的 H 和 B，可给出 $B-H$ 磁化曲线。

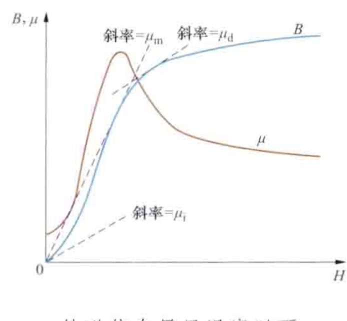
顺磁性、抗磁性以及在居里温度以上的铁磁性磁体的磁化曲线皆为通过原点的直线，因此对应的磁导率 μ 为与磁场强度 H 无关的常量。

铁磁体在居里温度以下的起始磁化曲线为一经过原点的曲线（见图）。由图可见铁磁体的磁通密度与磁场强度间的关系较为复杂，而且磁导率 μ 不仅与 H 有关，还与铁磁体的磁化历史有关（见磁滞回线）。

从图示磁化曲线上任一点与原点 0 连接的直线斜率代表该磁化状态下的磁导率 $\mu=B/H$。磁导率 μ 和磁化场的磁场强度 H 之间的 $\mu-H$ 曲线也在图上给出。

在实际应用中还可采用下述几种磁导率的定义：

（1）起始磁导率 μ_i，表示 H 趋于零时的磁导率的极



铁磁体在居里温度以下的起始磁化曲线

限值；

（2）微分磁导率 μ_d，表示 B-H 磁化曲线上各点的斜率，$\mu_d = \lim\limits_{\Delta H \to 0} \dfrac{\Delta B}{\Delta H} = \dfrac{dB}{dH}$；

（3）最大磁导率 μ_m，表示 μ-H 曲线上的极大值。

根据磁导率的大小可以把物质分为抗磁性、顺磁性和铁磁性三类：

（1）顺磁性物质的 μ_r 略大于 1，有锰、铬、铂、氮等；

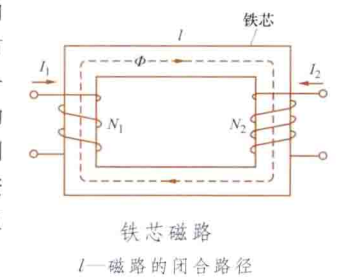
（2）抗磁性物质的 μ_r 略小于 1，有汞、铜、硫、金、银、锌、铅等；

（3）铁磁性物质的 μ_r 远大于 1，而且 μ_r 不是常量，有铁、钴、镍、钆以及它们的某些合金与化合物、铁氧体等。

cidongshi

磁动势

（magnetometive force） 磁场强度沿闭合路径的线积分。在许多电工装置中，磁通由线圈中的电流产生。根据安培环路定律，磁场强度沿闭合路径的线积分，等于套着该路径的线圈中电流 I 和线圈匝数 N 的乘积 IN。因此在电气工程中，沿着闭合路径的磁动势用乘积 IN 定义。闭合路径上的磁动势的方向和线圈中电流的方向符合右手螺旋关系。若线圈不止一个，磁动势等于每个线圈的 IN 的代数和。在国际单位制（SI）中，磁动势的单位是安［培］（A）。工程上又用安匝作为磁动势的单位。



铁芯磁路

l—磁路的闭合路径

图示铁芯上套着两个线圈。N_1、N_2 分别是两线圈的匝数，I_1、I_2 分别是两线圈中的电流。沿着图中虚线所示闭合路径 l 的磁动势等于 $N_1 I_1 + N_2 I_2$。

ciguang cailiao

磁光材料

（magneto-optical materials） 具有磁光效应或光磁效应的功能材料。在磁场作用下，物质的电磁特性（如磁导率、磁化强度、磁畴结构等）发生变化，使光波在物质内部的传输特性（如偏振状态、光强、相位、散射特性等）随之发生变化的现象称为磁光效应。磁光效应包括法拉第效应、克尔效应、塞曼效应、磁致双折射效应、磁圆振二向色性、磁线振二向色性、磁激发光散射、磁场光吸收、磁离子体效应等。在光照射物质后，物质磁性（如磁化率、磁晶各向异性、磁滞回线等）发生变化的现象称为光磁效应。主要应用于磁畴反转效应。

1845 年，法拉第首先发现平面偏振光通过沿光传输方向磁化介质时，偏振面产生旋转的现象，被称为法拉第效应。自法拉第发现磁光效应以来，人们在许多固体、液体、气体中均观察到磁旋光现象。应用最广泛的磁光材料有磁光玻璃、各种稀土元素掺杂的石榴石、稀土—过渡金属合金薄膜、磁性液体、磁性光子晶体、磁光液晶等材料。

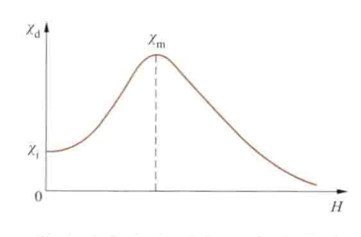
以磁光材料为基础的磁光器件，如磁光偏转器、磁光开关和调制器、隔离器、环形器、显示器、旋光器、磁强计、磁光盘存储器及各类磁光传感器等，在光信息处理、光纤通信、共用天线光缆电视系统和计算机技术，以及工业、国防、宇航和医学等领域有广泛的应用。

cihualü

磁化率

（magnetic susceptibility） 描述物质磁化性质的一种物理量，是物质内磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 与磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 之比，用 χ 表示，$\chi = \boldsymbol{M}/\boldsymbol{H}$。磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 是单位体积内分子磁矩的矢量和，因此磁化率是对于单位体积来定义的，故称为体积磁化率，简称为磁化率。有时也对于单位质量或一个摩尔物质内分子磁矩的矢量和来定义磁化率，分别称为质量磁化率 χ_m 和摩尔磁化率 χ_{mol}，它们和磁化率的关系分别为 $\chi_m = \chi/\rho$ 和 $\chi_{mol} = m\chi/\rho$，其中 ρ 和 m 分别为物质的密度和分子量。在国际单位制中，磁化率 χ 和磁导率 μ 的关系为 $\mu = \mu_0(1+\chi)$，$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。磁化率是无量纲、无单位的物理量。

根据磁化率的正负和大小，可把物质分为三类：顺磁性的、抗磁性的和铁磁性的。顺磁性物质的磁化率为正，数量级一般为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$；抗磁性物质的磁化率为负，数量级一般为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$，这两类物质的磁性很弱，统称为弱磁性物质。在通常温度和磁场情况下，可认为弱磁性物质的磁化率与磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 无关。铁磁性物质的磁化率不是常数，它与磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 间存在着复杂的函数关系。对铁磁性物质常引用微分磁化率，定义为 $\chi_d = \dfrac{d\boldsymbol{M}}{d\boldsymbol{H}}$，它与磁场强度的关系见图，图中 χ_i 为 $\boldsymbol{H} = 0$ 时铁磁性物质的磁化率，称起始磁化率，χ_m 称最大磁化率。当磁场强度 H 很大时，铁磁性物质的磁化率将变得很小，呈现磁饱和现象。



微分磁化率与磁场强度的关系

铁磁性物质在温度高于某一临界温度 T_C（称为居里温度）时，铁磁性消失，铁磁性物质转变为顺磁性物质。

cijilu cailiao

磁记录材料

（magnetic record materials） 利用其剩磁特性来记录信息的铁磁材料。被记录的信息是电信号或由非电信号转变而来的电信号。典型的例子是录音、录像等。磁记录的关键材料是磁记录介质和记录磁头材料。前者属于永磁材料，用于制造磁带、磁盘等。后者属于软磁材料，用于制造录音、录像、放音、放像磁头及抹音、抹像磁头等。

磁记录介质　要求记录信号的保真度高，保存性能好，记录信息的密度高，容易实现信息记录；抹去信息能做到干净彻底，不留残余信号；能获得信噪比大的复现信号等。根

据上述要求应选用剩磁大，矫顽力强，矩形比大的硬磁材料。现有的磁记录介质可分为微粒型和连续薄膜型两类。

（1）微粒型磁记录材料：用磁性氧化物微粒涂敷在载体（如塑料带）上，可制成记录磁带。最常用的磁性氧化物微粒是 γ—Re_2O_3，其剩磁 B_r 为（600～1000）$\times10^{-4}$T，矫顽力 H_C 为（250～400）$\times\frac{10^3}{4\pi}$ A/m，矩形比约 0.75。磁带上的磁性层厚度 5～12μm，磁盘上磁性层厚度仅 1～2μm。在视频场合需用 Co 作为添加剂，使 B_r 高达 1300×10^{-4}T，H_C 达 $600\times\frac{10^3}{4\pi}$ A/m。或选用 CrO_2 微粒，矩形比高达 0.86。

（2）连续薄膜型磁记录材料：不用载体，直接将磁性材料制成薄膜。如，Co-Ni-P 合金膜或 Fe-Co 合金膜等，B_r 可高达 $10\,000\times10^{-4}$T，矩形比达 0.8，薄膜厚度仅 0.1μm，用来制作磁鼓。

记录磁头材料　应选用 B_r 高、H_C 低的高导磁材料。为了适应小信号记录，要求初始磁导率高。选用电阻率高的材料以降低涡流损耗。记录磁头材料要求机械硬度大，以减少磨损。坡莫合金是较理想的磁头材料。实际的低频磁头多数选用 Mo-Ni-Fe 合金，饱和磁通密度为 7000×10^{-4}T，矫顽力为 $0.015\times\frac{10^3}{4\pi}$ A/m，初始相对磁导率达 50 000。在要求硬度高的场合可选用 Al-Si-Fe 合金，饱和磁通密度达 $11\,000\times10^{-4}$T，初始相对磁导率为 30 000，但威氏硬度为 Mo-Ni-Fe 合金的 4 倍。高频磁头的材料必须选用 Ni-Zn 铁氧体，饱和磁通密度为 3500×10^{-4}T，初始相对磁导率为 1800，硬度很高。

cijiyi cailiao

磁记忆材料

（magnetic memory materials）　具有两种或两种以上容易识别的稳定磁状态的磁性材料。在电子计算机一类智能设备中，用作二进制数字信号的记忆。要求具有两个稳定状态，以表示 0 和 1。利用磁性材料的剩磁特性可以实现信息记忆。

基本特性和要求　对磁记忆材料的要求是：接近于矩形的磁滞回线，适当大小的矫顽力，翻转速度快，温度特性好。

（1）磁滞回线尽可能接近于矩形，并具有足够大的剩磁。

（2）矫顽力大小适当。矫顽力过大不易存储信息，过小则容易失去信息。

（3）从一个稳定状态翻转到另一个稳定状态的速度要足够快，以适应高速存取。

（4）具有足够宽的使用温度范围和较高的温度稳定性。

分类　常见磁记忆材料有铁氧体、γ-Fe_2O_3、CrO_2、坡莫合金和石榴石等。

（1）铁氧体。磁芯存储器用铁氧体制作。Mn—Mg 系铁氧体的开关时间为 10^{-6}s 数量级，使用温度范围为 0～60℃。锂（Li）系铁氧体除开关时间可比 10^{-6}s 略短外，其使用温度范围更宽，可在 −50～150℃ 内使用。

（2）γ-Fe_2O_3 及 CrO_2 等。用作记忆元件，如磁鼓、磁盘、磁卡片、磁带存储器等。（见磁记录材料）

（3）坡莫合金薄膜。用于制作薄膜存储器，主要成分为 80%镍和 20%铁，镀覆在磷青铜或铁铜线表面，厚度仅 0.1～1μm。

（4）石榴石。以无磁性的石榴石（$Gd_3Ga_5O_{12}$）单晶作基片，用液相外延法在它上面生长几微米厚的强磁性石榴石单晶，磁畴直径为 3～5μm。用于制作磁泡存储器。

ciju

磁矩

（magnetic moment）　描述载流线圈磁性质及微观粒子物理性质的物理量。载有电流 I、面积为 S 的平面线圈的磁矩 $\boldsymbol{m}$ 定义为

$$\boldsymbol{m}=IS\boldsymbol{n} \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{n}$ 为沿平面线圈法线方向的单位矢量，其指向与电流 I 环绕方向成右螺旋关系。

磁矩为 $\boldsymbol{m}$ 的载流小线圈在磁通密度为 $\boldsymbol{B}$ 的磁场中受到的磁力 $\boldsymbol{F}$、磁力矩 $\boldsymbol{L}$ 分别为

$$\boldsymbol{F}=(\boldsymbol{m}\cdot\mathrm{grad})\boldsymbol{B};\ \boldsymbol{L}=\boldsymbol{m}\times\boldsymbol{B} \tag{2}$$

磁矩为 $\boldsymbol{m}$ 的载流小线圈产生的磁场的磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 在远处可表示为

$$\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\left[\frac{3(\boldsymbol{m}\cdot\boldsymbol{r})}{r^5}\boldsymbol{r}-\frac{\boldsymbol{m}}{r^3}\right] \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{r}$ 为磁矩到场点的位矢；μ_0 为真空中的磁导率。

通常讲磁矩都是指上面定义的磁偶极矩，此外尚有磁多极矩，其极次以 2^l（$l=1,2,\cdots$）表示。$l=1$ 时，即为上述磁偶极矩；$l=2$ 时，为磁四极矩等。磁多极矩概念用于电磁辐射理论中。

近代物理理论和实验研究表明，电子有磁矩，原子和原子核一般也有磁矩。原子中电子绕核的轨道运动相当于一个环形电流，相应地有轨道磁矩 $\boldsymbol{\mu}_e$；电子本身还具有自旋运动，相应地具有自旋磁矩 $\boldsymbol{\mu}_s$。原子磁矩则等于原子核磁矩与原子中各电子磁矩的总和，但原子核磁矩很小，要比电子磁矩小三个数量级，因此可以认为原子磁矩等于原子中各电子轨道磁矩与自旋磁矩的矢量和。无论是电子轨道磁矩、自旋磁矩，还是原子磁矩都是量子化的。不仅如此，它们沿空间任一方向 z（例如外磁场方向）的投影也都是量子化的。

近代物理理论和实验还证明，质子、中子和其他微观粒子也都有磁矩。

通常说的条形磁铁的磁矩等于磁铁两磁极间的距离与一个磁极强度的乘积。它也是一个矢量，方向规定为沿着两磁极的连线，自 S 极指向 N 极。

cilian

磁链

（magnetic linkage）　见电感。

cilu

磁路

（magnetic circuit）　约束磁通的区域。许多电气装置的部件由铁磁材料构成（有的包含小段空气隙），其周围绕着通有电流的线圈或其中装着永磁铁，使铁磁部件中建立磁通。由于铁磁材料的磁导率比非铁磁材料的磁导率高很多，磁通几乎全部约束在铁磁材料所限定的空间和空气隙中，磁通的路径区域形成磁路。变压器的铁芯、继电器的衔铁和空气隙、电机的铁芯部分和空气隙等，都是磁路的实例（见图 1）。

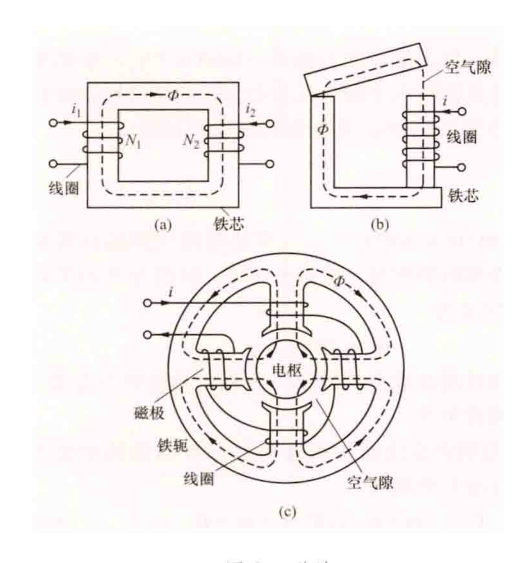


图 1　磁路

(a) 变压器磁路；(b) 继电器磁路；(c) 电机磁路

直流磁路计算　磁路计算的任务，是确定各段磁路中的磁通量、磁位差和磁动势之间的定量关系。线圈中的电流是恒定电流，或者是频率较低的交流，因而可以忽略铁磁材料中的涡流作用，磁路计算成为直流磁路计算。直流磁路计算主要依据的规律是磁通连续性原理和安培环路定律。

磁通连续性原理　对于磁路中任一封闭面，穿过该封闭面的、各分支磁路中的磁通量代数和等于零（见磁通量）。这个定理也称作磁路的基尔霍夫第一定律。

安培环路定律　磁路中任一闭合路径上各段的磁位差的代数和，等于作用于该闭合路径上的磁动势（见磁场强度）。这个定理也称为磁路的基尔霍夫第二定律。

材料的磁特性　铁磁材料的磁特性，由材料的磁化曲线表示（见图 2）；非铁磁材料的磁导率可认为等于真空磁导率 μ_0（$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m）。

磁路计算中常见的假定　忽略由铁芯侧面进入非铁磁材料中的磁通；认为磁通在铁芯截面上均匀分布；忽略铁芯截面积急剧变化处的磁场变化，例如不考虑图 1 (a) 中铁芯四个角上截面积的不均匀性。

直流磁路计算举例　以图 1 (a) 中磁路为例。设磁通量 Φ 全部集中在铁芯内，而且在截面上均匀分布，有

$$B=\frac{\Phi}{A} \qquad (1)$$

式中 A 是铁芯截面积；B 是铁芯中的磁通密度。由安培环路定律得

$$Hl=N_1i_1+N_2i_2 \qquad (2)$$

式中 H 是铁芯中的磁场强度；l 是磁路的平均长度；N_1、N_2 分别是两个线圈匝数；i_1、i_2 分别是线圈中的电流；$N_1i_1+N_2i_2$ 即作用于闭合磁路上的磁动势。

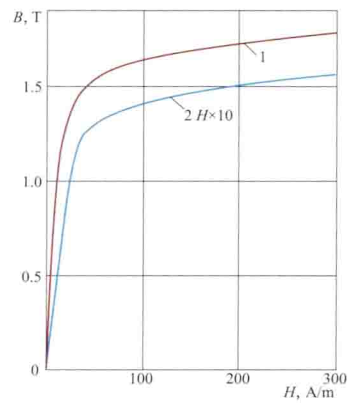


图 2　两种铁磁材料的磁化曲线

1—冷轧硅钢片；2—热轧硅钢片

(1) 若已知磁通量，由式 (1) 求磁通密度 B，由材料的磁化曲线查出对应的磁场强度 H，由式 (2) 计算磁动势。

(2) 若已知磁动势，由式 (2) 求出磁场强度 H，由磁化曲线查出对应的磁通密度 B，由式 (1) 计算磁通量 Φ。

若磁路形状复杂，不论是第一种情况或第二种情况，一般要反复试算才能得到满意的解答，或者用数值计算方法计算求解。

cimin dianzu cailiao

磁敏电阻材料　(magneto sensitive resistance materials)

对磁场敏感，具有磁阻效应的电阻材料。这种材料能通过磁阻效应将磁信号转换成电信号。磁阻效应包括材料的电阻率随磁场而变化和元件电阻值随磁场而变化两种现象。前者称磁电阻率效应或物理磁阻效应，后者称为磁电阻效应或几何磁阻效应。

磁场作用在导体上的各种物理效应（霍耳效应、磁阻效应）早在 1879～1883 年间在金属中就发现了，但因效应不显著，长期以来未得到广泛应用。半导体出现后，在 20 世纪 50 年代后半期开发了高迁移率的新型化合物半导体材料，如锑化铟（InSb）等，促进了霍耳器件和磁阻器件的研究、开发和应用。

磁敏电阻材料主要是电子迁移率大的半导体材料，还有铁镍钴合金等。常用的半导体有 InSb（或 InSb－NiSb 共晶材料）、砷化铟（InAs）和砷化镓（GaAs）等材料，一般用 N 型半导体材料制成。高纯度 InSb 和 InAs 的电子迁移率分别为 5.6～6.5$\mathrm{m^2\cdot(V\cdot s)^{-1}}$ 和 2.0～2.5$\mathrm{m^2\cdot(V\cdot s)^{-1}}$。InSb 的禁带宽度小，受温度影响大。GaAs 的禁带宽度大，电子迁移率也相当大[0.8$\mathrm{m^2\cdot(V\cdot s)^{-1}}$]，受温度影响小，且灵敏度也高。镍钴合金和镍铁合金的电阻温度系数小，性能稳定，灵敏度高，且具有方向性，可制作强磁性磁阻器件，用于磁阻的检测等方面。用半导体材料制作的磁敏电阻器、无触点电位器、模拟运算器和磁传感器等应用于测量、计算机、无线电和自动控制等方面。半导体 InSb－NiSb 磁敏电阻器用于磁场、电流、位移和功率测量及模拟运算器等方面，其阻值为 10Ω～1kΩ，相对灵敏度6～18（B=1T），电阻温度系数（－2.9%～0.09%）℃$^{-1}$（B=1T），极限工作频率 1～10MHz。在测量小于 0.01T 的弱磁场时，必须附加以偏置磁场才能进行。Ni－Co 薄膜磁敏电阻器主要用于探测磁场方向、磁带位置检测、测量和控制转速或速度以及无触点开关等方面。阻值有 1、10、250kΩ，相对灵敏度 2% 以上（磁通密度 3×10^{-3} T 以下），温度系数（3000±500）×10^{-6}℃$^{-1}$，感应磁场 3×10^{-3} T 以上，工作温度－55～150℃。在检测磁场反转或可逆磁场以下的磁信号时，也应采用偏置磁场。

磁敏电阻材料的发展与半导体材料的开发密切相关。发展趋势是：开发高准确度、高灵敏度、低噪声、高稳定性和可靠性以及多功能的磁敏器件与材料；研制非金属和金属化合物半导体、固溶体半导体、共晶体和共晶薄膜磁敏材料。

cipan cunchuqi

磁盘存储器　(magnetic disk storage)

利用磁记录技术在旋转的圆盘磁性媒体表面上进行数据存储的辅助存储设备。它以存储容量大、速度快、可靠性高、使用方便等优点

而得到了迅速的发展，成为计算机系统中重要的外部存储设备。

原理 磁盘存储器由磁记录媒体、磁头、磁头定位机构、主轴旋转机构和控制电路等部分组成。其基本工作原理是，在电路的控制下，通过磁头的电磁转换，把二进制信息"0"或"1"记录到旋转的磁记录媒体表面上，或把已经记录到媒体上的信息"0"或"1"读出来。通常用存储容量、面记录密度（道密度×位密度）、寻道时间、旋转等待时间、数据传输率、误码率、平均无故障间隔时间等技术指标来表征其性能的高低。

分类 根据记录媒体基片的不同和磁头与磁盘是否接触，分成硬磁盘和软磁盘两大类。

硬磁盘 它的媒体是在铝合金等金属材料或玻璃基片上敷以磁性记录层而成的。工作时，磁头和媒体保持一定的间隙，这种间隙也称为磁头的浮动高度。磁头浮动高度越小，记录密度就越高。亚微米级浮动高度技术已广泛在产品中运用。

根据磁头的工作方式，分为移动头和固定头硬磁盘；根据磁盘是否可换，分为可换型和固定型硬磁盘；根据磁层的不同，分为颗粒型媒体和连续薄膜媒体硬磁盘；根据基片直径的不同，分为14、10.5、9、8、5.25、3.5、2.5、1.8英寸等硬磁盘。

硬磁盘的特点：①基片采用铝合金等金属材料或玻璃，比较坚硬；②为了不损伤盘面，一般采用浮动磁头读/写；③为了使磁头浮动起来，主轴的转速较高，一般在5400～12 000r/min；④存储容量大，2010年代初，普通微型机配置的硬磁盘容量已达到几百GB（千兆字节），磁盘阵列等存储系统更达到几到几百TB（1TB=1024 GB）。

随着磁记录技术的进步，硬磁盘的容量和面记录密度将会得到更大的提高。

软磁盘 它的媒体是在聚酯薄膜的基片上敷以磁性记录层而成的。根据记录面，分为单面和双面软磁盘；根据盘片直径可分为8、5.25、3.5、2.5英寸等软磁盘；根据位密度，分为单密度和双密度软磁盘；根据道密度，分为普通道密度（48道/英寸）、倍道密度（96道/英寸）和多倍道密度（大于135道/英寸）软磁盘。如图所示为软盘驱动器。


软盘驱动器

软磁盘的特点是：①基片采用聚酯塑料，比较柔软；②磁头采用接触式读/写；③主轴转速较低，一般为360r/min；④存储容量比硬磁盘小，一般只有几百千字节至几兆字节，高档产品已达到几十兆字节。

软磁盘由于成本低、媒体可换以及易携带，曾被广泛应用于个人计算机和文字处理机中。

cipingbi cailiao

磁屏蔽材料

（magnetic shielding materials） 屏蔽磁场用的材料。磁屏蔽分三种情况：静磁屏蔽、低频电磁屏蔽及高频电磁屏蔽。实用上根据不同的情况选用不同的屏蔽材料。

静磁屏蔽 为了使杂散磁场集中到屏蔽罩壳体上，屏蔽罩应具有尽可能高的磁导率。所有磁导率高的软磁材料，电磁纯铁、球墨铸铁、坡莫合金、硅钢、软磁铁氧体等，原则上都可选用。设计上应按磁屏蔽要求、价格、壳体强度、加工性能等，综合考虑后选定。

低频电磁屏蔽 除屏蔽静磁外，还需兼屏蔽变化的电磁场。如工频电磁场等。除要求磁导率高外，还要求电导率高。较理想的材料是坡莫合金，考虑到价格和加工因素，大的屏蔽罩以电磁纯铁为宜。坡莫合金中含镍量高于40%时，磁导率和电导率都很好。此外，含铝15%～16%左右的铁铝合金也是常用的磁屏蔽材料。

高频电磁屏蔽 以屏蔽电磁波为主要目的，屏蔽所依据的原理是楞次定律，利用屏蔽罩内的感生电磁场来抵消外来电磁干扰，应选用良导体制作屏蔽罩，如铝和铜等。

ciqiangji

磁强计

（magnetometer） 测量空间的磁通密度或磁场强度等磁学量的仪器。磁场分恒定磁场和交变磁场，交变磁场又可分为低频磁场、高频磁场和脉冲磁场等；且为不同的应用需求，不同性质和不同强弱的磁场被产生在不同场合、不同尺寸、不同形状的空间中。对空间多样的磁场有多种测量方法。基于不同测量磁场方法制成的仪器或测量装置均称为磁强计，包括磁-力法磁强计、电磁感应法磁强计、磁通门法磁强计、电磁效应法磁强计、磁共振法磁强计、超导效应法磁强计和磁光效应法磁强计。

磁-力法磁强计 利用在被测磁场中的小磁针或载流线圈与被测磁场之间相互作用的机械力或力矩测量磁场。

利用可动小磁针与被测磁场之间的相互作用，使小磁针发生偏转，进而测量磁场的磁强计，是将对磁场的测量直接归结为对小磁针振荡周期和偏转角的测量。利用小磁针，可测量较弱的均匀或不均匀的磁场，相应磁强计的分辨力可达10^{-9}T。利用载流线圈制成的磁强计的测量范围是0.1～10T。利用磁致伸缩效应，并结合采用薄膜器件和光纤制成的磁-力法磁强计，其分辨力可达10^{-12}T。

此类磁强计在预报地震、观测地磁日变以及磁暴等方面应用较多，也用于检测岩样的磁性。

电磁感应法磁强计 按电磁感应定律测量空间的磁通密度，应用广泛，测量范围为10^{-13}～10^{3}T。把匝数为N、截面积为S的探测线圈置入磁通密度为B的被测磁场中，并采用某种方法，使探测线圈耦合的磁通发生变化，根据电磁感应定律，就会在探测线圈中产生大小正比于NS与磁通密度对时间的微分的乘积（差一个负号）的感应电动势。由于NS是一个常量，故只要测量出感应电动势对时间的积分，便可求出磁通密度的变化量。

根据探测线圈相对于被测磁通密度的变化关系，电磁感应法可分为固定线圈法、抛移线圈法、旋转线圈法及振动线圈法。测量恒定磁场时，可通过探测线圈的移动、转动或振动使磁通发生变化。具体地，利用固定线圈和冲击检流计制成的磁强计主要用于测量恒定磁场；基于电压表制成的磁强计主要测量高频磁场；以转动线圈或振动线圈制成的磁强计（见图1），也主要测量恒定磁场。

磁通门法磁强计 具有高磁导率的软磁合金铁芯线圈，在饱和交变磁场磁化条件下置入被测直流磁场或缓变磁场中，铁芯线圈上产生的感应电动势表现出非对称性，其中的

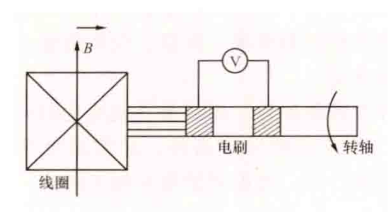


图 1 转动线圈磁强计原理示意图

偶次谐波分量与被测磁场的磁通密度成正比，如此，对磁场的测量，就转化为了对感应电动势偶次分量亦即交流电压的测量。基于此方法制成的磁强计主要用于测量恒定或缓变的弱磁场；将测量电路稍加改动，也可测量交变磁场。此种磁强计大量用于地质勘探、材料探伤、军事及宇航探测等。二倍频鉴相式磁通门磁强计的原理框图见图 2。

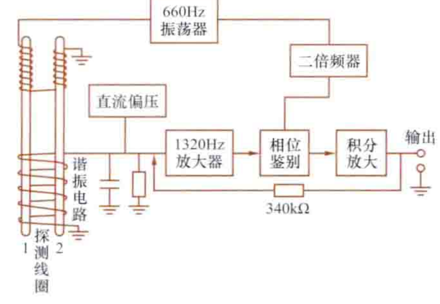


图 2 二倍频鉴相式磁通门磁强计原理框图

电磁效应法磁强计　利用金属或半导体中的电流在外磁场作用下产生的电磁效应（包括霍耳效应和磁阻效应）测量磁场。

基于霍耳效应原理制成的磁强计应用最广，其原理电路见图 3。当外磁场垂直于半导体样品中通过的电流时，会在半导体样品垂直于外磁场和电流的方向上产生电动势，这就是霍耳效应，因此产生的电动势又称霍耳电动势。利用霍耳电动势正比于外加磁场磁通密度的特性关系，通过测量霍耳电动势实现对磁通密度的测量的表计就是电磁效应法磁强计。这种磁强计既可测量 10^{-7}～10T 的恒定磁场，也可测量频率达兆赫、量值达 5T 的交变磁场，尤其对小间隙空间内磁场的测量更具优越性。

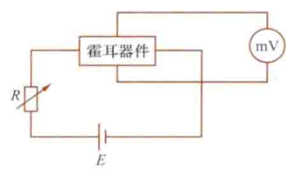


图 3 霍耳效应磁强计原理电路

基于磁阻效应制成的电磁效应法磁强计主要测量 10^{-2}～10T 的较强磁场；某些薄膜磁阻磁强计可测量频率高达 100MHz 的磁场，且在窄带下可测量 10^{-11} T 的微弱磁场。

磁共振法磁强计　当物质的微观粒子的能量状态在相应的磁能级之间变化时，会吸收或辐射出能量为 $h\omega$ 的电磁波，而 $h\omega=\gamma hB$，由此得 $\omega=\gamma B$，其中 γ 称为回转磁比，是一个物理常数，等于微观粒子的磁矩与其动量矩之比。因此，对某种确定的样品，只要测定出电磁波的角频率值 ω，就可求出外加磁场的磁通密度 B。这就是利用物质量子能级变化测量磁场的磁共振法的基本原理。

根据所选择的产生共振的微观粒子种类的不同，磁共振又分为核磁共振（共振粒子是原子核）、电子顺磁共振（共振粒子是电子）和光磁共振（共振粒子是碱金属原子或氦原子）。基于流水式核磁共振法制成的磁强计见图 4，它可测量 10^{-5}～25T 的均匀磁场，且也能测量不均匀磁场；基于电子顺磁共振法制成的磁强计主要用于测量 10^{-4}～10^{-1} T 的磁场；基于光泵法制成的磁强计用于测量小于 10^{-3} T 的磁场，分辨力可达 10^{-11} T。多种核磁共振法磁强计已商业化，其中光泵法磁强计在火箭、卫星、军事工程、生物磁学、地球物理等领域应用广泛。

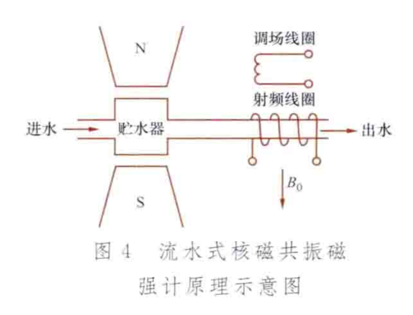


图 4 流水式核磁共振磁强计原理示意图

超导效应法磁强计　基于弱耦合超导体中的约瑟夫森效应原理测量磁场。

两个超导体 A 和 B 之间用绝缘薄膜隔离开，在特定的低温条件下，只有很小的超导电流在它们中通过，称这种弱耦合的超导体组合为超导结。超导结与可变电阻 R 和直流电源构成回路，调节 R，使流经超导结的直流超导电流小于临界值时，在超导结上会出现有电流、无电压的现象，这就是直流约瑟夫森效应。若超导电流大于临界值，则在超导结上会产生电压。

如果在超导结上维持一个有限的直流电压，超导结上会出现一个交变电流，其频率 f 在微波范围，其大小与超导结两端的电压成正比。直流电压下超导结产生交变电流从而辐射电磁波的特性又称交流约瑟夫森效应。

由于通过超导结的超导电流的相位差与超导结所处空间的磁场密切相关，设法测量出相应的电流，就可折算出超导结处磁场的大小，这就是超导效应法磁强计的基本原理。这种磁强计可测量 0.1T 以下微弱的恒定磁场或交变磁场，从直流到 10^{12} Hz 均具有良好的频率特性。射频超导量子磁强计的原理框图见图 5，图中，包含一个超导结的低感超导环与 LC 振荡回路耦合，LC 振荡回路由射频（RF）振荡器激励，其有效阻抗随超导环内磁通量的改变而变化。低频振荡器用来调制 RF 振荡器输出电压的振幅，其经过放大、检波、相敏检波积分放大后，又反馈回 LC 振荡回路；从积分器的输出电压，便可折算出超导环处磁通的变化量，进而可测算出相应的磁通密度。

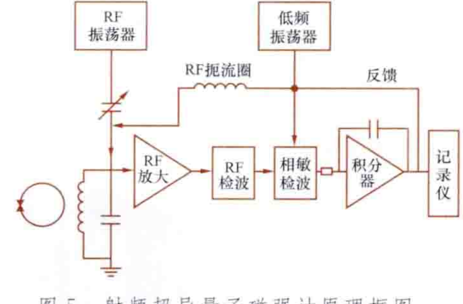


图 5 射频超导量子磁强计原理框图

磁光效应法磁强计　根据光所通过的介质具有透射还是反射的性质，磁光效应又分为法拉第效应和克尔效应。基于法拉第效应制成的磁强计的原理见图 6。具有良好透光性质的介质样品被置入磁通密度为 B 的螺线管中，光源发射的光经过平行光管变成平行光，再经起偏器变成偏振光，若偏

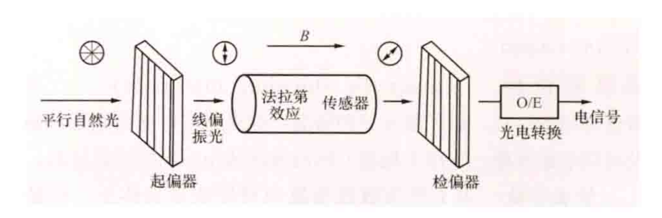


图 6 法拉第效应磁强计原理示意图

振光的传播方向与磁场的方向一致，偏振光在磁场作用下将引起偏振面旋转，即法拉第效应。而偏振面旋转角度θ与透射介质中的光程L以及外加磁场的磁通密度B成正比，即$\theta=\rho LB$，其中ρ为费尔德常数。在确定的温度和光源下，介质样品的ρ可视为常数，故只要选定介质样品的光程L，就能根据测得的θ确定磁通密度B。法拉第效应磁强计可测量0.1～10T的磁场。

克尔效应磁强计可测量高达100T的强磁场。这种磁强计主要用于测量低温超导磁场。

借助光纤已制成可测量$10^{-4}\sim10^{-1}$T较弱磁场的磁光效应法磁强计。

cishiwei

磁矢位 (magnetic vector potential) 描述磁场的辅助矢量位函数，它的旋度等于磁通密度，又称磁矢势。磁场是无散场，即磁通密度$\boldsymbol{B}$的散度等于零：$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$（见磁通量）。设$\boldsymbol{A}$为任意光滑矢量函数，由矢量分析公式$\nabla\cdot(\nabla\times\boldsymbol{A})=0$，可知$\boldsymbol{B}$可表示为某个矢量场$\boldsymbol{A}$的旋度，即

$$\boldsymbol{B}=\nabla\times\boldsymbol{A}$$

由上式可定义磁矢位$\boldsymbol{A}$。对于恒定磁场，磁矢位$\boldsymbol{A}$只是空间坐标的矢量函数。对于时变磁场，$\boldsymbol{A}$是空间坐标和时间的矢量函数。令S是以闭合路径l为周界的曲面，由于

$$\int_S\boldsymbol{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=\int_S(\nabla\times\boldsymbol{A})\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=\oint_l\boldsymbol{A}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

所以磁矢位沿闭合路径l的线积分，等于穿过曲面S的磁通量。定义式只规定了$\boldsymbol{A}$的旋度，$\boldsymbol{A}$的散度有不同的选择方案。

恒定磁场中的磁矢位　恒定磁场中，常规定$\nabla\cdot\boldsymbol{A}=0$，称这种规定为库仑规范。若所研究的区域内充满了同一种各向同性的线性磁介质，在库仑规范的条件下，磁矢位$\boldsymbol{A}$满足矢量函数的泊松方程

$$\nabla^2\boldsymbol{A}=-\mu\boldsymbol{J}$$

式中μ是磁介质的磁导率，$\boldsymbol{J}$是区域内的电流密度。若区域内无电流，即$\boldsymbol{J}=\boldsymbol{0}$，则磁矢位$\boldsymbol{A}$满足矢量函数的拉普拉斯方程：$\nabla^2\boldsymbol{A}=\boldsymbol{0}$。结合具体磁场问题解上述拉普拉斯方程或泊松方程，求出磁矢位$\boldsymbol{A}$，再按定义式可求得磁通密度$\boldsymbol{B}$。

设真空中有闭合导线l，其中有恒定电流I。空间中任意点P的磁矢位$\boldsymbol{A}$可直接由下式计算

$$\boldsymbol{A}=\frac{\mu_0}{4\pi}\oint_l\frac{I\mathrm{d}\boldsymbol{l}}{r}$$

式中$\mathrm{d}\boldsymbol{l}$是导线的长度元；r是从电流元$I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$所在处到点P的距离；$\mu_0$是真空磁导率。

时变电磁场中的磁矢位　在时变电磁场中，仍可按式$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$定义磁矢位$\boldsymbol{A}$。此时，还要引入一个电标位，可用它和磁矢位一起分析、计算时变电磁场问题。

citi

磁体 (magnets) 具有或可使其具有外磁场的物体或器件。依照磁体在磁场作用下所呈现的性质，可将磁体分为顺磁性、抗磁性、铁磁性（含亚铁磁性）及反铁磁性等几大类。

（1）顺磁性磁体：指磁体在外磁场作用下磁化后，内部产生了附加磁场，其附加磁场的方向与外磁场相同性质，如稀土金属的盐类等。

（2）抗磁性磁体：指磁体磁化后，其附加磁场的方向与外磁场相反性质，如超导体、食盐等。

（3）铁磁性磁体：指磁体磁化后，其附加磁场的方向与外磁场相同，附加磁场远大于使它磁化的磁场，即磁化率χ很高，从而导致铁磁体的强磁性。P. E. 外斯（Pierre Ernst Weiss）提出了分子场和磁畴假设，定性地解释了铁磁性。近代量子力学用自旋磁矩和交换力的概念说明了形成分子场和磁畴的原因，建立了近代铁磁理论。典型的铁磁有铁、镍等。

铁磁体在电工和电子技术中广泛应用，如硅钢、磁钢等用于制造机电设备或仪器仪表中的磁路、铁芯及永久磁铁等。铁氧体应用在高频场合及磁记录、磁记忆等领域，推动了电子计算机及智能机器人的发展。

（4）反铁磁性：是指在无外磁场作用下，磁体内相邻原子或离子的磁矩相互抵消，单位体积中的净磁矩为零，宏观上不呈现磁性。如Cr、α—Mn，某些稀土金属等。

citongji

磁通计 (fluxmeter) 测量磁通量的仪器。用于空间磁场和材料磁特性的测量。具体有磁电系、电子式、数字式磁通计，又称韦伯计或特斯拉计。

最早的磁电系磁通计，其结构类似于磁电系检流计（见图1），但未设置反抗力矩，用无力矩的柔软导流丝将电流引入可动线圈，因此可动线圈可停留在任何位置。它当中一般装有调整机构，可将指针或光标调到刻度盘上便于读取数据的位置。

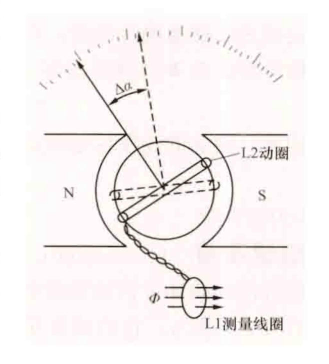


图1　磁电系磁通计

使用时，将处于恒定磁场中的测量线圈L1与磁通计的动圈L2连接。如果使L1中的磁通发生变化，例如将L1移出磁场（$\Delta\Phi=\Phi$），则在L1中感应出电动势，从而有电流通过动圈，使其偏转$\Delta\alpha$角。根据$\Delta\alpha$与磁通变化量$\Delta\Phi$成正比，且$\Delta\Phi$在数值上等于Φ的关系，可确定被测的磁通量Φ。磁电系磁通计按毫韦伯分度，也称毫韦伯计。磁电系磁通计的灵敏度较低，仅为0.1毫韦伯/分度。如需要更高灵敏度，必须使用电子式、数字式磁通计或冲击检流计。



图2　TD8620手持式特斯拉计

原理上，磁电系磁通计对测量线圈的感应电动势有积分作用，其指针的偏转反映积分结果。如此，若采用电子积分器、放大器等与数字电压表相组合，即可形成电子式磁通计；若将L1中感应电动势e经电压-频率转换器转化为与其成正比的脉冲系列，再用计数器累积计数，即进行数字积分，则所计数值正比于L1中磁通的变化量，故又构成了数字磁通计。图2所示为手持式特斯拉计。

为便于现场测量，有数字磁通计与数字磁强计合二为一的商品化磁测量仪器。

citongliang

磁通量 (magnetic flux) 磁通密度的曲面积分。简称磁通。它可以用穿过曲面的磁场线数形象地表示。对曲面 S 上的任一面元 $\mathrm{d}\boldsymbol{S}$，把位于该面元的磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 分解为与面元垂直和相切的两个分量 B_n 和 B_t，定义穿过此面元 $\mathrm{d}\boldsymbol{S}$ 的磁通量 $\mathrm{d}\boldsymbol{\Phi}$ 为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\Phi}=B\cos\theta\mathrm{d}S=\boldsymbol{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

式中 θ 为面元的法线方向和磁通密度方向之间的夹角。穿过曲面 S 的磁通量 $\boldsymbol{\Phi}$ 为

$$\boldsymbol{\Phi}=\int_S\boldsymbol{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

如果 S 是一平面，面上的磁场均匀，而且 $\boldsymbol{B}$ 的方向垂直于该平面，则上式简化为 $\boldsymbol{\Phi}=BS$ 或 $B=\boldsymbol{\Phi}/S$，这表明磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 的量值等于与磁场垂直的单位面积上的磁通量。在国际单位制（SI）中，磁通量的单位是韦［伯］（Wb）。

磁场线是闭合曲线。因此，对于磁场中的任何闭合曲面 S，穿入的磁场线数恒等于穿出的磁场线数，即穿出闭合曲面 S 的净磁通量为零，其数学表示式为

$$\oint_S\boldsymbol{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=0$$

上式表示磁通的连续性，它是磁场固有的一个特性。对应的微分形式为 $\boldsymbol{B}$ 的散度为零，即

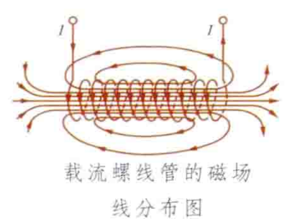
$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$$

因此，磁通的连续性也就是磁通密度的无散度特性。

citong midu

磁通密度 (magnetic flux density) 表征磁场强弱程度和磁场方向的物理量，又称磁感应强度。设磁场中某点有正电荷 q，它的速度是 $\boldsymbol{v}$，磁场对它的作用力是 $\boldsymbol{F}$；定义该点的磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 的量值为 $B=F/(qv)$，$\boldsymbol{B}$ 的方向为 $\boldsymbol{F}\times\boldsymbol{v}$ 的方向。在国际单位制（SI）中，磁通密度的单位是特［斯拉］(T)，也有用高斯（Gs）作单位的，$1\mathrm{T}=10^4\mathrm{Gs}$。测量磁通密度的常见方法，有基于感应电动势效应的探测线圈法和基于霍耳效应的霍耳片法等。

磁场线　为了形象地描绘磁场，可画出磁场线的分布图。在这种人为的有方向的磁场线上，规定任意点的切线方向是该点的磁通密度方向。对于定性分析，所画磁场线的根数可随意选定。如果还要求磁场线能反映磁场强弱，可令垂直于磁场方向的单位截面积内穿过的磁场线的根数，正比于该处的 B 值，从而磁场线密度大的地方，磁通密度大，即磁场强。磁场线通常是环绕电流的闭合曲线。图示为载流螺线管的磁场线分布图。



载流螺线管的磁场线分布图

磁场对运动电荷的作用力　具有速度 $\boldsymbol{v}$ 的点电荷 q 位于磁通密度为 $\boldsymbol{B}$ 的位置，电荷受到的力称为洛伦兹力，按下式计算

$$\boldsymbol{F}=q(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})$$

此式也可以看作 $\boldsymbol{B}$ 的定义式。

磁场对载流导线的作用力　长度是 l 的直导线中通有电流 $\boldsymbol{I}$，当它置于磁通密度是 $\boldsymbol{B}$ 的均匀磁场中时，导线受力 $\boldsymbol{F}$ 为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{I}(\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{B})$$

当导线与 $\boldsymbol{B}$ 的方向垂直时，力 $\boldsymbol{F}$ 的量值最大。

ciweicha

磁位差 (difference of magnetic potential) 一段磁路内磁场强度的线积分。由磁路中的点 a 经路径 l 到点 b 的磁位差 U_m，由下式定义

$$U_m=\int_a^b\boldsymbol{H}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

式中 $\boldsymbol{H}$ 是路径 l 上的磁场强度；$\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 是对应点处的长度元。

设 a、b 段磁路由同一种材料制成，其截面是均匀的，磁场是均匀的而且磁场强度线与截面垂直，路径 l 的方向和磁场强度线方向一致，则 a、b 段的磁位差等于磁场强度的量值 H 和路径长度 l 的乘积，即

$$U_m=Hl$$

在国际单位制（SI）中，磁位差的单位是安［培］(A)。

cixing cailiao

磁性材料 (magnetic materials) 能由磁场来磁化或改变其磁化强度的物质。根据磁导率或磁化率的大小一般可以把物质分为弱磁性材料和强磁性材料两大类。弱磁性材料包括顺磁材料（见顺磁性）和抗磁材料（见抗磁性）。强磁性材料包括铁磁材料（见铁磁性）、亚铁磁材料及反铁磁材料（见反铁磁性）。电工技术中常用的铁磁材料和亚铁磁材料又可分为软磁材料和硬磁材料（见永磁材料）两大类。近代功能磁性材料如磁记录、磁记忆、磁屏蔽、磁补偿等材料发展很快。

cizhi shensuo

磁致伸缩 (magnetostriction) 由于磁化而引起的铁磁性物质的弹性变形。当铁磁性物质的温度降至居里点以下，自发磁化形成磁畴时，由于晶体点阵平衡条件改变而发生形变，是磁致伸缩的根本原因。在技术磁化过程中，磁畴结构改变并趋向同一方向时，便能观察到磁致伸缩的宏观效应。

纵向磁致伸缩　沿磁场方向的伸长和缩短。设在磁通密度为 B_0 的恒定磁场磁化下相对伸长为 $\varepsilon_0=\Delta l/l$，则有 $\varepsilon_0=\alpha B_0^2$，式中常数 α 取决于材料性质。设磁化外磁场为恒定磁场 B_0 和交变磁场 B 的叠加，而且 $B\ll B_0$，可以导出相对伸长为 $\varepsilon=\beta B$，式中常数 β 取决于材料性质及 B_0，β 称为磁致伸缩应变恒量。若用机械方法使材料两端固定，不允许其伸长，则材料内产生的应力为 $\sigma=r\beta$，r 为磁致伸缩应力恒量，且 $r=C_{11}\beta$，式中 C_{11} 表示纵向弹性模量。

横向磁致伸缩　与磁场垂直方向的伸长和缩短。产生纵向磁致伸缩的同时，常伴随着较小的横向伸缩。

磁致伸缩扭转　利用磁致伸缩效应可以产生扭转振动。其方法是使圆柱形材料产生纵向磁致伸缩的同时，再加上围绕圆柱轴线的环形交变磁场。

cizhi shensuo cailiao

磁致伸缩材料 (magnetostriction materials) 因磁化而引起弹性变形的磁性材料。磁致伸缩的原因是磁化时材料磁畴结构变化引起晶格间距的改变，因此磁致伸缩材料必须是铁磁物质。常用的磁致伸缩材料是以铁、钴、镍为主的合金及软磁铁氧体。

磁致伸缩材料的常用参数有饱和磁致伸缩系数λ_S和机电耦合系数K。

（1）饱和磁致伸缩系数λ_S：即多晶材料饱和磁化时，磁致伸缩所产生的相对伸长。

（2）机电耦合系数K：用以衡量某材料通过磁致伸缩把电能转换成机械振动能的效率。它与磁导率μ、纵向弹性模量C_{11}及磁致伸缩应力恒量γ的关系是$K^2=\mu\gamma^2/C_{11}$。

常用磁致伸缩材料的成分及特性见表。

常用磁致伸缩材料的成分及特性

材　料	成　分	$\lambda_S\times10^6$	K
镍	Ni≥99.5%	−35	0.20～0.31
铁铝合金	Al 13%	40	0.22～0.33
镍钴合金	Co 4.5%	−33	≈0.51
软磁铁氧体	Fe、Ni、Co、Cu等氧化物	−28	0.19～0.32
铁钴钒合金	Co 49%、V 2%、Fe	70	0.20～0.37

此外，镍铁合金也是常用磁致伸缩材料，性能随镍铁比例而变。

cizhi huixian

磁滞回线 (magnetic hysteresis loop) 表示磁场强度周期性变化时强磁性物质磁滞现象的闭合磁化曲线。它表明了强磁性物质反复磁化过程中磁化强度M或磁通密度B与磁场强度H之间的关系。由于$B=\mu_0(H+M)$，式中μ_0为真空磁导率。若已知一材料的M-H曲线，便可求出其B-H曲线，反之亦然。将强磁性材料（包括铁磁性和亚铁磁性材料）样品从剩余磁化强度$M=0$开始，逐渐增大磁化场的磁场强度H，磁化强度M将随之沿图1中0ab曲线增加，直至到达磁饱和状态b。增大H，样品的磁化状态将基本保持不变，因此直线段bc几乎与H轴平行。当磁化强度到达饱和值M_s时，对应的磁场强度H用H_s表示。0ab曲线称为起始磁化曲线。此后若减小磁化场，磁化曲线从b点开始并不沿原来的起始磁化曲线返回，这表明磁化强度M的变化滞后于H的变化，这种现象称为磁滞。当H减小为零时，M并不为零，而等于剩余磁化强度M_r。要使M减到零，必须加一反向磁化场，而当反向磁化场加强到$-H_{cm}$时，M才为零，H_{cm}称为矫顽力。如果反向磁化场的大小继续增大到$-H_s$时，样品将沿反方向磁化到达饱和状态e，相应的M为$-M_s$。e点和b点相对于原点对称。此后若使反向磁化场减小到零，然后又沿正方向增加，样品磁化状态将沿曲线egkb回到正向饱和磁化状态b。egkb曲线与bnde曲线也相对于原点0对称。由此看出，当磁化场由H_s变到$-H_s$，再从$-H_s$变到H_s反复变化时，样品的磁化状态变化经历着由bndegkb闭合回线描述的循环过程。曲线bndegkb称为磁滞回线。bc及ef两段相应于可逆磁化过程，M为H的单值函数。由于磁滞现象，磁滞回线上任一给定的H，对应有两个M值。样品处于哪个磁状态，决定于样品的磁化历史。

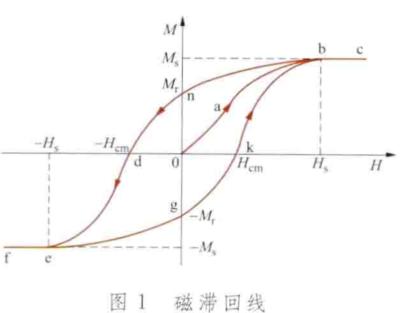


图1 磁滞回线

若磁化场的最大$|H|$值在小于$|H_s|$的范围内反复磁化，将得到小一些的磁滞回线（见图2）。所有磁滞回线中上述bndegkb为最大的一个，常称为极限磁滞回线。各磁滞回线两端顶点的连线称为正常磁化曲线，如图2中虚线所示，它和起始磁化曲线基本重合。

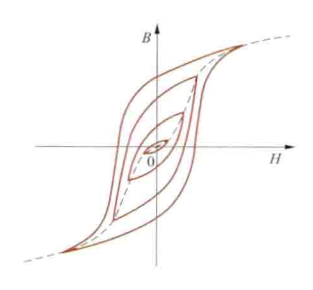


图2 强磁体的正常磁化曲线

用B-H表示的强磁性材料的磁滞回线其走向和形状与M-H磁滞回线大致相同。在电工技术中更多使用B-H表示的磁滞回线。

上述磁滞回线是在磁场作缓慢变化时得到的，也称为准静态磁滞回线。在交变磁场作用时，仍然有磁滞现象，磁滞回线也是一闭合回线，称为动态磁滞回线。由于涡流效应等影响，动态磁滞曲线的形状和面积大小等都与准静态磁滞回线的不同。

可以证明，B-H磁滞回线所包围的面积正比于在一次循环磁化中的能量损耗。对准静态磁滞回线，此损耗仅为磁滞损耗，对于动态磁滞回线，此能量损耗包括磁滞损耗和涡流损耗等。

cizhi sunhao

磁滞损耗 (magnetic hysteresis loss) 铁磁体等在反复磁化过程中因磁滞现象而消耗的能量。它是电气设备中铁芯损耗的组成部分。

磁滞损耗表现为磁化过程中有一部分电磁能量不可逆转地转换为热能。在准静态反复磁化过程中，单位体积的铁磁体被交变磁场磁化一周所产生的磁滞损耗正比于磁滞回线所包围的面积$\oint H\mathrm{d}B$。设交变磁场的频率为f，则单位时间、单位体积的磁滞损耗为$f\cdot\oint H\mathrm{d}B$。因此选择磁滞回线面积小的材料或降低工作频率都可以减少磁滞损耗。在工程中计算时，对较强交变磁场常用经验公式为

$$W_h\approx K_1 f B_m^{1.6}$$

式中f为工作频率；B_m为磁滞回线上磁通密度的最大值；K_1为取决于材料性质及其他有关因素的常数。

cizu

磁阻 (reluctance) 一段磁路的磁位差和磁通量的比值。磁阻由该磁路的几何形状、尺寸、材料的磁特性等因素决定。在国际单位制（SI）中，磁阻的单位是每亨［利］（H^{-1}）。

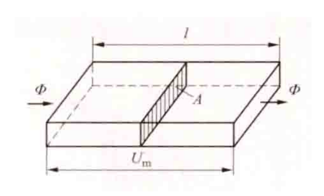
图示一段磁路，它有均匀长方形截面，磁场强度线和截面垂直。令截面上的磁通量是 Φ，磁路两端的磁位差是 U_m，则这段磁路的磁阻 R_m 定义为

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi}$$

上式也称为磁路中的欧姆定律。若图示磁路由同一种材料制成，磁阻 R_m 也可用下式计算

$$R_m = \frac{l}{\mu A}$$

式中 A、l 分别是该段磁路的截面积和长度（见图）；μ 是磁路材料的磁导率。如果材料是非铁磁物质，一般认为 μ 是常量，等于真空磁导率 μ_0。由上式可方便地计算磁阻。如果材料是铁磁物质，μ 不是常量，一般不计算磁阻。磁阻概念多在作定性分析时使用。



一段长方形截面的磁路

串联磁路的磁阻　两段磁路串联时，总磁阻 R_m 是每段磁路的磁阻（R_{m1} 和 R_{m2}）之和，即

$$R_m = R_{m1} + R_{m2}$$

例如继电器的衔铁断开时，继电器铁芯组成的磁路中串联有由空气隙构成的一小段磁路，使整个磁路的磁阻增加。

磁导　磁阻的倒数称磁导。在 SI 单位制中，它的单位是亨[利]（H）。用 Λ 代表磁导，磁导的定义式是

$$\Lambda = \frac{\Phi}{U_m}$$

也可用下式计算图示一段磁路的磁导

$$\Lambda = \frac{\mu A}{l}$$

式中各符号的意义同前。

cunchu xitong

存储系统

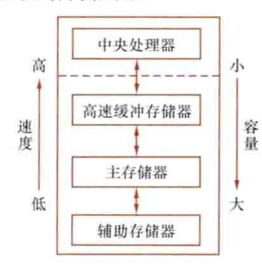
存储系统　（storage system）　由计算机中主存储器和辅助存储器组成的子系统。其功能是按指定的位置存入或取出二进制代码程序和数据信息。用存储设备和存储管理部件构成的系统层次结构，可满足现代计算机存储容量大、存取时间短和价格低的基本要求。

存储设备　存储系统中主要设备是存储器，通常是将信息数字化后利用电、磁或光学等方式的媒体加以存储。

存储器性能参数　主要为：①存储器容量，即可容纳二进制信息总量；②存取周期，又称存储器周期，是相邻两次访问存储器的最短时间间隔；③价格，即每位容量的价格。

存储器类型　按物理介质可把存储器分为半导体存储器、磁芯存储器、磁盘存储器、磁带存储器以及光盘存储器等；按存取方式可分为随机存取存储器、只读存储器、顺序存取存储器、直接存取存储器和联想存储器；按实现方式可分为静态存储器、动态存储器；按功用可分为只读存储器、读写存储器等。

存储层次　根据程序局部性原理，计算机通常采用速度由快到慢、容量由小到大的各种存储器组成存储器层次体系，以满足高速、大容量及低成本的要求。图为存储系统的层次结构框图。



存储系统层次结构

（1）高速缓冲存储器：是处于中央处理器与主存储器的一级存储器，有的设置在 CPU 内部，用于存放当前使用的部分程序和数据，以改善主存储器与中央处理器的速度匹配，其主要特征是存取速度极快，但容量较小，对系统程序员透明。

（2）主存储器：是计算机的基本组成部分，用于存放一个用户或多个用户处于活动状态的程序、数据、运行结果、操作系统的常驻部分，以及有关的系统和应用软件，简称主存，又称内存。其主要特征是存取速度快、容量较大、可随机存取。半导体存储器广泛用作主存储器，其容量从几兆字节到几千兆字节。

（3）辅助存储器：作为主存储器的后缓存储器，用于存放大量的系统软件、应用软件和数据。可与主存储器成批交换数据。其主要特征是存储容量大，非易失性、可靠性高和每位成本低，但存取速度较慢。对于磁盘存储器可直接存取，而磁带存储器则只能顺序存取。

存储控制和管理　对高速缓冲存储器的控制及它与主存储器之间的数据交换由硬件实现，以提高存取速度。对主存储器和辅助存储器的控制和管理由硬件和软件共同实现。为对多道程序环境下的存储器实施有效的管理，应具有分配、保护和主存扩充三方面的功能。

（1）存储器分配：存储管理的最基本的功能是为每道程序分配必要的主存和辅存空间，使它们各得其所。在较完善的系统中还允许程序在运行过程中继续申请附加的存储空间，程序在主存中“移动”。

（2）存储器保护：应保证多道程序都能在自己的存储空间中运行而互不干扰，还必须防止因一道程序非法访问并非属于自己的存储空间，而扰乱了其他程序，尤其要防止侵犯操作系统的内存区。

（3）主存扩充：并非从物理上来扩充主存容量，而是通过虚拟存储技术（见虚拟存储器）从逻辑上来扩充主存容量，使用户所看到的主存容量远大于实际主存的容量。这样可使系统运行比物理主存空间大的程序，或让更多道的程序并发执行。



DC-DC xing kaiguan wenya dianlu

DC-DC 型开关稳压电路 (DC-DC type switching voltage stabilizing circuits) 由 DC-DC 开关变换器（斩波器）、高频整流滤波电路及反馈控制电路组成的一种开关型稳压电路。它广泛应用于通信设备和其他系统中，作为分布式供电电源用。其输出电压可低于或高于输入电压，也可与输入电压同极性或反极性。按输入、输出有无变压器可分为有隔离和无隔离变压器两类。

无隔离变压器的 DC-DC 开关稳压电路 主电路主要由升压型、降压型及降压-升压型等 DC-DC 变换器组成，另外还有丘克（Cuk）变换器、Sepic 变换器和 Zeta 变换器等。

降压（buck）型变换器 其原理图如图 1 所示。理论上其稳态电压比为 $U_O/U_I=D$，D 为占空比，故输出电压 U_O 小于输入电压 U_I。输出端电流连续，但输入端电流不连续。

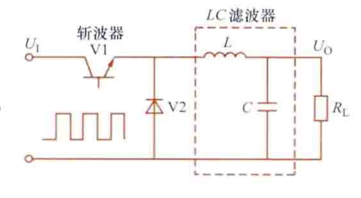


图 1 降压型变换器原理电路图

升压（boost）型变换器 其原理图如图 2 所示。理论上其稳态电压比为 $U_O/U_I=1/(1-D)$，故输出电压 U_O 高于输入电压 U_I。输入电流连续，但输出电流不连续。该电路适合于做有源功率因数校正电路。升压型电路与降压型电路对偶。

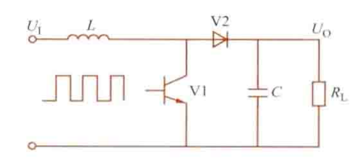


图 2 升压型变换器原理电路图

降压-升压（buck-boost）型变换器 其原理图如图 3 所示。其特点是功率开关管 V1 导通时，电感贮能，V1 关断时，L 将贮能传送给负载。理论上其稳态电压比为 $U_O/U_I=D/(1-D)$，输出电压可高于或低于输入电压，取决于 D 大于或小于 0.5。输入和输出电流均不连续。

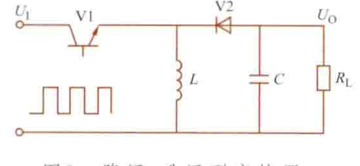


图3 降压-升压型变换器原理电路图

有隔离变压器的 DC-DC 开关稳压电路 有单端开关稳压电路和双端开关稳压电路。

单端开关稳压电路 主要特征是高频变压器的磁芯被脉动电流励磁，一个周期内磁芯中的磁通只在次磁滞回线（B-H回线的第一象限）上变化，因而磁芯的磁性能不能充分利用。它所采用的变换器，按一个周期内励磁方向不同，可分为正激变换器、反激变换器和带隔离的 Cuk 变换器等。可以有多路输出。

双端开关稳压电路 可分为推挽式、半桥式和全桥式开关稳压电路。

D chufaqi

D 触发器 (D flip-flop) 在时钟脉冲有效作用时期内，它的输出新状态和输入端 D 状态相同的集成触发器。由于接线简单，在时序逻辑电路中得到广泛应用。

图 1 是 D 触发器的图形符号，其中 D 为输入端，C1 为时钟信号输入端，输出为两个互补信号，稳态时的逻辑状态相反，一般用 Q 和 $\overline{Q}$ 表示。D 触发器的逻辑功能如表所示，即时钟信号到达时触发器的新状态 Q^{n+1}（亦称次态）和输入端 D 的状态相同。

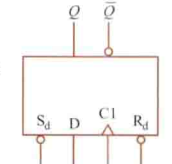


图 1 D 触发器的图形符号

D 触发器的电路结构有多种型式，在双极型集成电路中经常采用图 2 所示的维持阻塞结构。这是一种边沿触发型电路结构，触发器的次态仅取决于 CP 信号上升沿到达前 D 的状态。

D 触发器的逻辑功能表

D	Q^{n+1}
1	1
0	0

设 $D=0$，则门 G6 的输出 $Q_6=1$，在 $CP=0$ 时，$Q_3=1$，故 $Q_5=0$。当 CP 上升沿到达后，由于 $Q_5=0$，因此 Q_3 仍为 1，而门 G4 的三个输入信号都为 1，故 $Q_4=0$。Q_4 的状态一方面使 $\overline{Q}=1$，$Q=0$，触发器清 0；另一方面又使门 G6 被封锁。这样，即使 D 的状态发生变化，也不会再影响 Q 的状态，从而保证了 D 触发器在 CP 上升沿作用后处于 0 状态。故门 G4 输出反馈到门 G6 输入的连线称为置 0 维持线，也称为置 1 阻塞线。

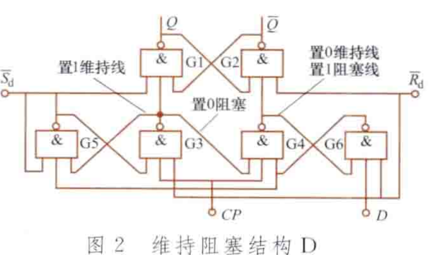


图 2 维持阻塞结构 D 触发器的逻辑图

同理，设 $D=1$，在 $CP=0$ 时，$Q_3=Q_4=1$，故 $Q_6=0$，$Q_5=1$。当 CP 上升沿到达后，由于 $Q_6=0$，因此 Q_4 仍为 1，而门 G3 的三个输入全部为 1，故 $Q_3=0$，它一方面使触发器置 1，另一方面通过两条线使门 G5 和 G4 被封锁，使在 $CP=1$ 期间 Q_5 保持 1，Q_3 保持 0，维持触发器处在 1 状态，故门 G3 输出反馈到门 G5 输入的连线称为置 1 维持线；门 G3 输出反馈到门 G4 输入的连线阻止了输入 D 变化使 Q_4 变成 0，亦即阻止 Q 清 0，因此，将此线称为置 0 阻塞线。

图 2 中 $\overline{S_d}$ 和 $\overline{R_d}$ 称为异步置位端和异步复位端。通过在 $\overline{S_d}$ 和 $\overline{R_d}$ 端加入低电平信号可以将触发器直接置 1 或置 0，而

不受时钟和输入信号的影响。

在 CMOS 集成电路中，D 触发器多采用传输门主从结构型式，如图 3 所示。这也是一种边沿触发型的电路结构。当 $CP=0$ 时传输门 G1 和 G6 导通，G2 和 G5 截止，从触发器保持状态不变，主触发器接收 D 端的状态，此时主、从触发器之间的联系被切断。等到 CP 的上升沿到达时，门 G1 和 G6 变为截止、G2 和 G5 变为导通，主触发器将该瞬间 D 的状态保持下来，并经过门 G5 传给从触发器，这时主触发器与输入端的联系被切断。

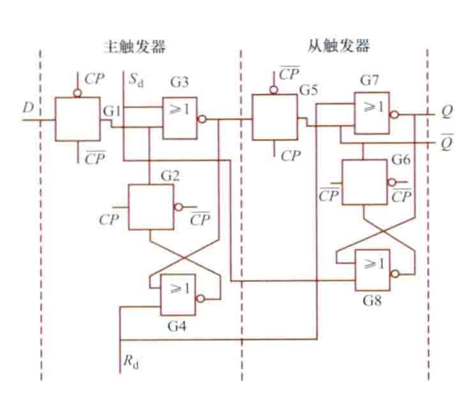


图 3　利用传输门的 CMOS 主从结构 D 触发器

daqi guodianya

大气过电压　（atmospheric overvoltage）　雷云放电时在建筑物、导线或电气设备上所形成的过电压，也称雷电过电压。雷电过电压分雷电直击过电压和雷电感应过电压两类。

雷电直击过电压　雷电直接击中建筑物及电力系统（导线、设备等）时产生的过电压。雷电直击过电压对任何电压等级的线路和设备都可能产生危险。

雷直击于电气设备时，如果电气设备无避雷器保护，则会出现极高的过电压，使电气设备绝缘损坏。因此电气设备必须并联避雷器以限制雷电直击过电压。装有避雷器保护的电气设备所受雷电直击过电压的值由避雷器保护特性来决定。图为记录避雷器放电次数的避雷器计数器。



避雷器计数器

雷电感应过电压　雷击于导线或电气设备附近时，由于静电和电磁感应而在导线或电气设备上形成的过电压。在雷云放电的先导阶段，充满先导通道的电荷对导线产生静电感应，在负先导附近的导线上积累了异号的正束缚电荷。当先导到达附近地面时，主放电开始，先导通道中的电荷被中和，与之相应的导线上的异号束缚电荷得到了解放，以波的形式向导线两侧流动。电荷流动形成的电流乘以导线的波阻抗即为向两侧流动的静电感应过电压波。此外，先导通道电荷被中和时还会产生时变磁场，使架空导线产生电磁感应过电压波。

雷电感应过电压通常只对 35kV 及以下电压等级的线路和设备构成威胁，另外对电子设备也构成严重危害。

daqi jiaozheng yinshu

大气校正因数　（atmosphere correction factor）　外绝缘在测试条件下的闪络电压与标准参考大气条件下的闪络电压之间，互相换算所采用的校正因数。

标准参考大气条件规定为：温度 $t_0=20℃$；气压 $b_0=101.3\text{kPa}$；绝对湿度 $h_0=11\text{g/m}^3$。

外绝缘的闪络电压与试验时的大气条件有关。

通常一定空气放电距离下的闪络电压随着空气密度的增加而升高，这是因为电子的平均自由行程会随空气密度的增加而减小，电离过程会随之而减弱。在某些电极情况下，闪络电压还随湿度的增加而升高，这可能是由于水分子容易吸附电子而形成负离子的缘故，从而使带电质点的平均自由行程大为减小，电离程度减弱。但当相对湿度大于 80% 时，闪络电压的偏差会变得较大。

以 K_t 代表大气校正因数。考虑在某种大气条件下的外绝缘试验电压为 U 时，它应由标准参考大气条件下的试验电压 U_0 乘以 K_t 来求得，即

$$U=U_0K_t$$

反之，可将测量到的闪络电压 U，校正到标准参考大气条件下的电压值 U_0。

K_t 是两个因数的乘积，即 $K_t=K_1K_2$，其中 K_1 为空气密度校正因数；K_2 为湿度校正因数。

K_1 值很大程度上与相对空气密度 δ 有关，即

$$\delta=\frac{b}{b_0}\times\frac{273+t_0}{273+t}$$

式中 t 为实际试验条件下的温度，以摄氏度来表示；b 为大气压力，以 kPa 表示。

K_2 值较大程度上决定于试验电压的类型（冲击电压、交流电压或直流电压）和绝对湿度 h_0 与相对空气密度 δ 的比率 h_0/δ。

K_1 和 K_2 的具体计算方法，可从中国国家标准《高电压试验技术　第一部分：一般定义及试验要求》（GB/T 16927.1—2011）中查得。

daxitong jianmo

大系统建模　（large-scale system modeling）　建立大系统中各种实际系统的数学模型、网络模型或者物理模型，必要时可进行简化。大系统建模包括基本假设、建模方法、模型类型和模型简化等内容。

基本假设　为保证系统模型的可靠性与真实性，在建立实际大系统的数学模型时必须遵循下述基本假设：相对独立性、选择性和因果性。①相对独立性，即可分离性。因为实际系统总是与环境或其他系统有各种联系，大系统尤其如此，为了建立模型，需要假设系统可以从它所处的复杂环境中分离出来，成为一个相对独立的整体。②选择性。根据系统分析的目的和简化模型的需要，在建立模型时要选择主要因素和相互联系，忽略次要因素。③因果性。作为系统模型中的输入和输出，需要具有某种因果关系，不能把没有因果关系的两种因素或同一原因的两种结果分别作为输入和输出。

建模方法　建立大系统的数学模型时，需要引入多重建模、分解和简化的原则，以结构分析为指导，通过层次分解，把整体建模转化为低维子系统的建模，并通过各种简化手段使模型具有简单易解的形式。建立系统数学模型通常有两类方法：演绎模型法和归纳模型法。

（1）演绎模型法。根据已知的原理、定律及关于实际系统结构和参数的知识，进行从一般到特殊的演绎推理，建立数学模型。这种方法可能得到唯一解，但要求详细了解实际系统。

（2）归纳模型法。利用对系统输入输出的观测资料、实际的运行或实验数据，从“黑箱”观点出发，用归纳方法，特别是以人工智能为工具的各种启发式规则和知识库，建立系统的等效数学模型。这类方法不需要详细了解实际系统内部结构参数，但需要选择适用的模型。

由于大系统的复杂性，单纯采用演绎法或归纳法都有困难，实际上是二者相结合。又因实际系统常由小系统关联组成，可以先建立小系统模型，再辨识其相互关联，分两步建立大系统的模型。

模型类型 根据系统的空间、时间变量的离散化情况，有三类数学模型：①集中参数模型。其空间变量是离散的，时间变量是连续的，如常微分方程和代数方程。②离散时间模型。其空间、时间变量都是离散的，如差分方程。③分布参数模型。其空间、时间变量都是连续的，如偏微分方程。

模型简化 降低大系统数学模型的阶数或状态维数，以简化大系统的数学模型的方法。大系统包含的元件众多，元件间关联复杂，输入和输出数目也较多，建立大系统的精确的数学模型存在困难，因此需要建立简化的数学模型。在建立模型的过程中，应对系统的集结和分解程度进行决策。集结是将系统的状态变量（单元）归并成数目较少的新的状态变量（组合单元）。分解是将系统分成更小的单元或子系统。集结程度小和分解程度细的模型，包含的状态变量多，阶次高，求解困难。反之，集结程度大和分解程度粗的模型，阶次低，求解不困难，但得到的解可能无实际意义。简化模型的建立与人们的使用目的、经验、概括能力和对系统的理解程度有关。大系统模型的简化，常采用集结法和摄动法。

集结法　将系统中众多状态变量按线性组合归并成少数新的状态变量，用新的状态变量组成系统模型。归并的简化模型应保留原模型的主要动态特性。

摄动法　用摄动的小参数 ε 来概括表示大系统数学模型中的一类测量精度低，或值随环境和运行情况波动的参数，将大系统的动态方程分解为慢过程部分和包含摄动小参数的快过程部分。有两种方法：奇异摄动法和非奇异摄动法。

（1）奇异摄动法：当小参数项出现在原微分方程组左侧时，如

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}_1 &= \boldsymbol{A}_{11}\boldsymbol{x}_1+\boldsymbol{A}_{12}\boldsymbol{x}_2+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}_1\\ \varepsilon\dot{\boldsymbol{x}}_2 &= \boldsymbol{A}_{21}\boldsymbol{x}_1+\boldsymbol{A}_{22}\boldsymbol{x}_2+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}_2\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

其中，$\boldsymbol{x}_1$、$\boldsymbol{x}_2$ 为系统状态量，$\boldsymbol{u}_1$、$\boldsymbol{u}_2$ 为系统输入量，$\boldsymbol{A}_{11}$，$\boldsymbol{A}_{12}$，$\boldsymbol{A}_{21}$，$\boldsymbol{A}_{22}$，$\boldsymbol{B}_1$，$\boldsymbol{B}_2$ 为系统状态系数。若略去小参数摄动项，令 $\varepsilon=0$，则可得简化模型

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}_1 &= \boldsymbol{A}_{11}\boldsymbol{x}_1+\boldsymbol{A}_{12}\boldsymbol{x}_2+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}_1\\ 0 &= \boldsymbol{A}_{21}\boldsymbol{x}_1+\boldsymbol{A}_{22}\boldsymbol{x}_2+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}_2\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

这种方法适用于强耦合系统中快变化过程与慢变化过程可分离的场合。

（2）非奇异摄动法：当小参数项出现在原方程组右侧时，如

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}_1 &= \boldsymbol{A}_{11}\boldsymbol{x}_1+\varepsilon\boldsymbol{A}_{12}\boldsymbol{x}_2+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}_1\\ \dot{\boldsymbol{x}}_2 &= \varepsilon\boldsymbol{A}_{21}\boldsymbol{x}_1+\boldsymbol{A}_{22}\boldsymbol{x}_2+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}_2\end{aligned}\right\}\quad(3)$$

若略去小参数项，令 $\varepsilon=0$，可得简化模型

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}_1 &= \boldsymbol{A}_{11}\boldsymbol{x}_1+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}_1\\ \dot{\boldsymbol{x}}_2 &= \boldsymbol{A}_{22}\boldsymbol{x}_2+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}_2\end{aligned}\right\}\quad(4)$$

这种方法适用于弱耦合系统。

以上两种常用的大系统模型降阶方法都是基于大系统的时域模型（状态空间模型）的降阶方法。另外还有一些基于大系统的频域模型（传递函数模型）的降阶方法，特别是适合于多输入多输出系统的降阶方法，包括帕德—劳思混合法、帕德—模态混合法、矩阵连分式法等，其中矩阵连分式法只能用于输入维数等于输出维数的情况。

daxitong lilun

大系统理论

（large-scale system theory）　采用数学模型，通过分解-协调或分解-集结的方法，将控制理论中的稳定性理论、最优控制理论、多变量控制理论和运筹理论中的线性规划、非线性规划、动态规划等加以推广，应用于大系统分析和综合的科学。包括大系统理论发展历程、大系统结构、大系统建模、大系统稳定性分析、大系统最优化、大系统递阶与分散控制等内容。

大系统具有规模庞大、结构复杂（环节较多、层次较多或关系复杂）、目标多样、影响因素众多、高维性、随机性、模糊性等特征。电力系统是典型的大系统之一，是电能生产、输送、分配、消费的各种设备按照一定的技术和经济要求有机组成的一个整体。电力系统是相互关联的一个整体，任何一个点发生的电磁变化过程都会瞬间影响和波及全系统。

经典控制理论和现代控制理论都是建立在集中控制的基础上，应用到大系统时遇到困难。这不仅由于系统庞大，信息难以集中，也由于系统过于复杂，集中处理的信息量太大，难以实现和处理。因此，迫切需要发展新的系统分析和控制理论来解决大系统的问题，大系统理论是解决大系统分析和综合问题的有效工具。

发展　1965 年 I. 莱夫科维茨（I. Lefkowitz）提出大系统多层结构的概念，即可根据控制（管理）的功能将大系统分解为若干层次。1965～1970 年 M. 梅萨罗维茨（M. Mesarovic）等人提出大系统多级结构的概念，可把大系统分解成若干子系统，把总目标分解成若干子目标。1968 年提出大系统的分散控制方法，可用一组只有局部信息的控制器来分别控制大系统的各个子系统，实现大系统的次优控制，以减少信息传输方面的困难和费用。国际自动控制联合会（IFAC）于 1976 年在意大利的乌第纳召开了第一届大系统学术会议，于 1980 年在法国的图鲁兹召开了第二届大系统学术会议。1980 年在荷兰出版国际性期刊《大系统——理论与应用》。

大系统结构　大系统理论的基本问题是其结构方案。大系统结构取决于组成大系统的子系统集合及各子系统之间的互联关系。各种工程和非工程大系统有两种基本结构形式：分散结构和递阶结构。

分散结构：研究分散控制问题时的一种控制结构形式。

递阶结构（又称层次结构）：从控制的角度区分为多重结构、多层结构和多级结构。①多重结构是按照系统的内部状态和特征，以不同抽象程度来划分层次的递阶结构。②多

层结构是在制定复杂系统问题决策时，按照决策的性质和控制的功能来划分层次的递阶结构形式。递阶越向上的层次功能水平越高，决策时间越长，考虑问题越原则化。③多级结构是在研究优化和控制时，将关联子系统及控制器递阶形式分级排列成“金字塔”形的一种递阶结构，是在对关联子系统实行局部控制的基础上，再加上一个或几个协调级形成的，协调级用来解决子系统之间的控制作用不协调的问题。

大系统建模　为进行定量分析，需要建立各种实际系统的数学模型、网络模型或物理模型。数学模型是用来描述系统动态和静态特性、性能指标、运行状态的数学表达式。网络模型是用来表示系统信息流或物质流、时间顺序、逻辑关系等，由支路、节点等组成的网络图、计划评审图等。物理模型是在大系统仿真中，用来模仿实际系统的物理过程和运行状态。（见大系统建模）

大系统性能分析　包括对大系统的稳定性、可控性、可观性、可靠性、鲁棒性等性能进行定性和定量的分析与评价。

稳定性是分析、综合、设计大系统时要考虑的首要性质。大系统的稳定性分析建立在判定子系统稳定的基础上，研究关联作用应满足什么条件才能保证大系统稳定，以及如何进行判定，也要研究结构扰动对稳定性的影响，称之为“交连稳定性”问题。分析的方法有加权和李雅普诺夫函数法、向量李雅普诺夫函数法、输入输出法等。共同的步骤是：①建立各子系统及其关联的数学模型。②不计关联求得各子系统的稳定条件，并对其稳定性作出定量测度。③考虑相互关联，根据子系统稳定性定量测度和子系统之间关联强弱的某个定量测度去标定大系统的稳定条件，当条件成立时，关联大系统就是稳定的。这一方法的优点是能减少计算量，而且能较清楚地了解影响系统稳定性的各种因素。

大系统其他特性的分析与评价，以及大系统与各子系统相应特性关系的建立，一般也采用类似于稳定性分析的思路和步骤。对大系统可控性和可观性的研究，主要针对复合系统、分散系统、奇异摄动系统等类型的大系统，判定方法有验证矩阵秩条件的代数准则等。

大系统最优化　包括大系统的状态与参数估计、随机控制等。建立分离定理与进行状态估计，是解决大系统随机控制问题的关键。对于随机大系统，如果分离定理成立，则最优随机控制问题可分两步求解：①对大系统的状态进行最优估计；②根据估计的状态求解确定型大系统的最优控制。在关联系统的线性二次型高斯随机干扰问题上得到了较成熟的成果。对于非经典信息结构，大系统随机控制的最优控制律一般也是非线性的。

大系统递阶与分散控制　按照信息交互的方式和关联处理的方式，大系统控制可分为递阶控制和分散控制。递阶控制主要是分解—协调，把高阶大系统分解成若干子系统，实现子系统的最优，再通过协调，实现大系统的全局最优。分散控制是由若干分散的控制器或决策者、操作者共同完成大系统的总控制目标。（见递阶控制与分散控制）

为了处理大系统控制和管理中不确定性的复杂性因素，正在进行新的理论探索，同时发展起来的一般系统论、耗散结构理论、协同学、超循环理论、模糊集理论以及人工智能与知识工程等，对大系统理论的发展将提供新思路、新理论和新方法。

参考书目

涂序彦．大系统控制论．北京：北京邮电大学出版社，2005.

daxing jisuanji

大型计算机　（large-scale computer）　性能介于小型计算机和巨型计算机之间的通用计算机。通用是指计算机能面向多种应用。早期受器件技术的限制，采用十进制定点运算器的计算机适用于商业事务处理；采用二进制浮点运算器的计算机适用于科学计算。1964 年 IBM 公司宣布了 360 系列机结构，采用集成电路，一台计算机支持上述的两种应用，从此通用计算机得到迅速发展。1981 年，IBM 公布了扩展的 System/370 体系结构。1990 年 9 月，IBM 开发了 System/390 系列计算机系统，其性价比远远高于 System/370 系统。2000 年以后，IBM 推出 Z 架构主机，Z 系列主机的旗舰产品为 Z/990。

大型计算机在终端联机系统、计算机网络系统、大型科学计算等应用场合，起着主干的作用。

大型计算机采用了与巨型计算机相近的先进技术来提高运算速度，包括并行多处理机、射极耦合逻辑电路高速器件、高密度微组装技术等。

daima

代码　（code）　表示信息并能进行输入、传送、处理和输出的数码。字母、数字、控制符等都要表示为对应的二进制数码才能被数字设备识别。计算机中使用的代码有 ASCII 码、BCD 码、EBCDIC 码等。

ASCII 码　美国信息交换标准码，是美国国家标准协会（ANSI）制订的，用 7 个二元码组成一个字符的编码标准。共有 128 种组合，它包括数字符、字母符、运算符和控制符等，见表 1。

表 1　ASCII 码

$b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1$								
$b_4b_3b_2b_1$	b_7 b_6 b_5							
	000	001	010	011	100	101	110	111
0 0 0 0	NUL	DLE	SP	0	@	P	`	p
0 0 0 1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0 0 1 0	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
0 0 1 1	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0 1 0 0	EOT	DC4	$	4	D	T	d	t
0 1 0 1	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0 1 1 0	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0 1 1 1	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
1 0 0 0	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1 0 0 1	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1 0 1 0	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1 0 1 1	VT	EXC	+	;	K	[	k	{
1 1 0 0	FF	FS	,	<	L	\	l	|
1 1 0 1	CR	GS	—	=	M	]	m	}
1 1 1 0	SO	RS	.	>	N	^	n	~
1 1 1 1	SI	VS	/	?	O	_	o	DEL

中国国标 GB 1988—1998《信息技术　信息交换用七位编码字符集》编码及国际标准 5 号码与 ASCII 码兼容。

BCD 码　二—十进制代码，用带正整数权的 4 位二进制数表示一个十进制数的一种代码。4 位二进制码有 16 种组合，其中前 10 种组合分别表示一个十进制的数，后 6 种组合为非法码。权为 8421 的 BCD 码见表 2。

表 2　BCD 码

十进制数＼权	8421	十进制数＼权	8421
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	非法码	1010
3	0011		1011
4	0100		1100
5	0101		1101
6	0110		1110
7	0111		1111

EBCDIC 码　扩展二-十进制交换码，用 8 位二进制码表示一个字符、数字、控制和专门图形符的编码标准，它有 256 个字符集。8 位二进制编码也可装配成两个 4 位的 BCD 码，这在某些应用中更为方便。

Daiweinan dingli

戴维南定理　（Thevenin theorem）　把一个复杂的有源线性非时变二端网络等效为一个最简单的含有电压源的有源二端网络的定理。1883 年法国科学家 L. C. 戴维南（L. C. Thevenin）提出该定理，1853 年德国人 H. L. F. 亥姆霍兹（H. L. F. Helmholtz）也曾提出过，因而又称亥姆霍兹-戴维南定理。

正弦交流电路中的戴维南定理　任一有源线性非时变二端网络 N，对外可用一电压源和一等效阻抗的串联组合来等效（图 1）：此电压源的电压 $\underline{U}_{oc}$ 等于二端网络 N 的开路电压，等效阻抗 $\underline{Z}_{eq}$ 等于二端网络 N 的全部独立电源置零后的输入阻抗（见图 2）。电压源 $\underline{U}_{oc}$ 和阻抗 $\underline{Z}_{eq}$ 的串联组合也称为戴维南等效电路。

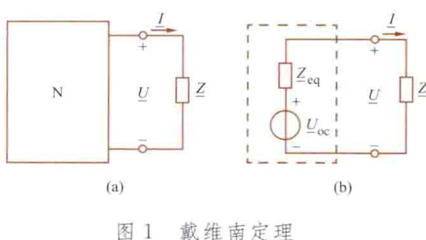


图 1　戴维南定理

（a）原电路；（b）戴维南等效电路

应用　戴维南定理可用来简化有源二端网络，是常用的电路定理之一。例如，仅需计算电路中某一支路的电压和电流时，可将该支路以外的其他部分用戴维南等效电路替代，有时则很方便。如图 1（a）中，若负载 $\underline{Z}$ 是可变的，则利用戴维南定理可知，当 $\underline{Z} = \underline{Z}_{eq}^{*}$（$\underline{Z}_{eq}^{*}$ 是 $\underline{Z}_{eq}$ 的共轭复数，见阻抗匹配）时负载上可获取最大功率。

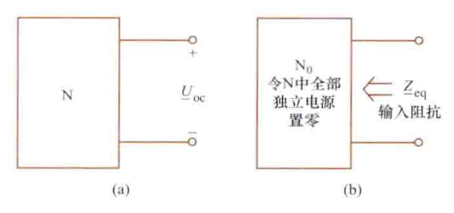


图 2　开路电压和输入阻抗

（a）开路电压 $\underline{U}_{oc}$；（b）输入阻抗 $\underline{Z}_{eq}$

应用戴维南定理时，要求二端网络 N 与外电路之间没有受控源耦合或磁耦合，并且二端网络 N 的戴维南等效电路存在且唯一。当电路中存在非线性元件时，只要把非线性元件归入到外电路中，对剩下的线性网络仍可进行戴维南等效变换。

戴维南定理还可推广应用于具有时变元件的有源线性多端口网络。

danjie jingtiguan

单结晶体管　（unijunction transistor）　具有一个 PN 结和两个基极的半导体器件。在一块低掺杂的 N 型硅基片一侧的两端各引出一个欧姆接触电极，叫作第一基极 b1 和第二基极 b2。而在硅片的另一侧较靠近 b2 处，用合金或扩散法掺入受主杂质，形成 PN 结，引出电极，称为发射极 e，构成单结晶体管，如图 1（a）所示，其图形符号如图1（b）所示。单结晶体管的伏安特性如图 2 所示。由图可知，它与隧道二极管相似，亦具有负阻特性。中国生产的单结晶体管的型号有 BT31、BT32、BT35 型等，其中 B 表示半导体，T 表示特种管，3 表示三个电极，第四个数字表示耗散的功率分别为 100、200、500mW。

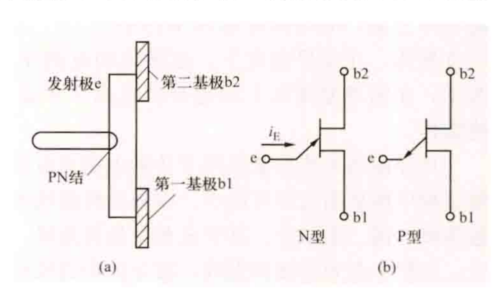


图 1　单结晶体管

（a）结构；（b）图形符号

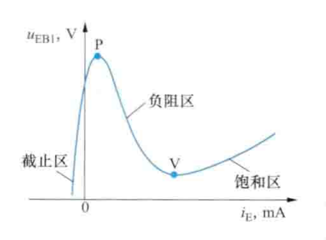


图 2　单结晶体管的伏安特性

单结晶体管的负阻特性可以用来构成弛张振荡器，常用于晶闸管的触发电路中。

danpian weixing jisuanji

单片微型计算机　（single chip microcomputer）　把中央处理器（CPU）、只读存储器（ROM）、随机存取存储器（RAM）、输入/输出接口电路、定时器和时钟、中断控制、系统总线等制作在一块集成电路芯片上，可独立进行工作，形成具有完整的计算机功能的微型计算机，简称单片机。

早期的单片机主要应用领域面向控制，有位操作指令，适用于事件控制，又称微控制器。随着单片机功能的提高，应用领域从传统的控制扩展为控制处理、数字信号处理、数值和数据处理。单片机体积小、可靠性高，作为嵌入式处理器在图像处理、人工智能、机器人等领域使用。

单片机的字长有 4 位、8 位、16 位、32 位。按其控制功能和处理功能的不同，频率可达几十兆赫兹，片内有几百字节的 RAM，可以有不同容量的 ROM 或可擦可编程只读存储器（erasable programmable read only memory，EPROM）、Flash 存储器，有多级中断、定时/计数、异步串行口、模/数变换器、数/模变换器、脉宽调制器、监视跟踪定时器、快速乘法器等。外部可扩充直接寻址的大容量 RAM 和 ROM。

单片机开发系统作为研制嵌入式控制器应用系统的仿真和调试的得力工具，包括宿主机、在线仿真器、通用编程器和仿真软件。在线仿真器为所研制的目标系统提供硬件环境。

daodian cailiao

导电材料 (conductive materials) 在电场作用下能传导电流的材料。导电材料可分为良导体、不良导体和超导体三类。良导体的电阻率约小于 $10^{-8}\Omega \cdot m$，否则为不良导体。在临界温度下，超导体的电阻率在可测范围内为零；在临界温度以上的超导体也属于不良导体，甚至是绝缘体。

良导体的主要功能是用于传输电能及电信号。要求在传输过程中能量损失尽可能少。以导电性能优劣为序，良导体包括银、铜、铝和金。其中金和银是贵金属，只用于特殊场合，如用于高频的镀银铜线，镀金的印刷线路板等。大量应用的是铜和铝。铜的导电性能和机械加工性能都优于铝，但它在自然界的蕴藏量远少于铝，因此在一般应用中有以铝代铜的趋势。

从传输损失来考虑，不良导体不应用于电能传输，其用途可分为：

(1) 与良导体组成复合材料。包括铝包钢、不锈钢包铜等，用于增加强度、耐腐蚀、耐高温以及降低价格等。

(2) 用于能量转换。如，作为电热丝用的镍铬合金主要用于把电能转换成热能；制造白炽灯的钨丝、钼丝用于把电能转换成光能。

(3) 用于信号转换。例如制造热电偶及各种传感器。

(4) 用于和导电无关的其他目的。如用作磁性材料、导热材料及结构材料等。

常用的导电金属元素及其主要特性见表。

常用的金属元素的电阻率、电阻温度系数和线膨胀系数

金属	电阻率 ($\Omega \cdot m \times 10^{-8}$)20℃	电阻温度系数 ($\times 10^{-3}$) 0～100℃	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}$) 0～100℃
Ag	1.49	4.3	19.2
Al	2.5	4.6	23.2
Au	2.06	4.02	14.1
Co	5.57	6.04	13.7
Cr	14.1	3.01	6.5
Cu	1.55	4.33	16.8
Fe	8.6	6.51	11.7
Mo	5.03	4.73	5.0
Na	4.28	5.46	71
Ni	6.84	6.92	12.7
Pb	19.2	4.28	28.9
Pt	9.81	3.96	8.9
Sn(β)	13.1	4.47	30.9*
W	4.89	5.1	4.5
Zn	5.65	4.17	63.1*

* 指平行于晶轴的方向。

daona

导纳 (admittance) 见相量法。

daoti

导体 (conductors) 具有能在电场作用下流动的自由载流子的物质。其特点是内部含有在电场作用下能定向移动的带电粒子，通常是电子或离子。包括金属导体、非金属导体及超导体（其流动的载流子为电子对）。

在电工技术中金属导体应用范围最广，主要用于制造传输电能或电信号的各种电线、电缆。此外，电热材料、电极材料、磁性材料、电阻材料、电机和变压器绕组等都需用导体制作。

金属导体　最常用的金属导体是铜 (Cu) 和铝 (Al)，它们是制造电线、电缆的主要金属；其次是铁 (Fe) 和铅 (Pb)，铁常用于增加电线的机械强度，铅曾用于制作电缆的外护层。常用的电热材料有镍 (Ni)、铬 (Cr) 以及用于制造白炽灯的钨 (W) 和钼 (Mo)。熔体材料的主要成分是锡 (Sn) 和铅。钎焊材料以锡和铅为主，添加了锌 (Zn) 等物质。银 (Ag)、金 (Au)、铂 (Pt) 等贵金属用于特需场合，如用于制作电触头、高频导线、印制电路板等。此外，自复熔断器中需要用钠 (Na)。

电导率大小是评定金属导体性能的主要依据，但必须兼顾其他性能，如机械强度、可加工性、价格等。

非金属导体　常用的非金属固体导电材料石墨，主要用于制造电极和碳刷。由于石墨属于半金属，也可把它列为半导体类。

液体导电材料在电化学中有广泛应用，在电工中极少用。气体导电材料常用于制造各种灯管、熔断器及灭弧装置。

超导体　金属导体的电阻率随温度升高而增加，非金属导体的电阻率随温度升高而减小，这一特征反映了金属导体的导电机理与其他导体不相同，是电子导电。当温度降到接近绝对零度的某一临界温度时，某些材料的电阻突然降为零，这种电阻消失的现象称为超导电性。具有超导电性的材料称超导体，超导态时的载流子为电子对。超导体有元素超导体、合金超导体和化合物超导体三类，常用的有铌、铟、锡、铌-钛合金、铌-锆合金、锡化三铌 (Nb_3Sn)、镓化三钒 (V_3Ga)。超导体可供超导磁体、超导电机、超导电缆等应用。低温超导材料达到超导态的温度一般很低，在液氦温度范围内。20 世纪 80 年代发现了铱钡铜氧 (YBaCuO) 陶瓷超导体，在液氮温度 (77K) 附近即具有超导电性，又被称为高温超导材料，这是超导技术的一大飞跃。高温超导材料的研究已取得突破性进展，在电工及电子学中具有良好的应用前景，但圆满的理论尚未建立。

dengliziti xianshi qijian

等离子体显示器件 (plasma display panel, PDP) 以气体放电单元作为显示像素的平板显示器件。广泛应用于大屏幕壁挂电视和多媒体显示等领域。等离子体是正离子和电子密度大致相等且具有一定电离度的电离态气体，气体放电是产生等离子体最常用的方法。由于光辐射始终伴随着气体放电过程，因此气体放电在照明和显示等领域有广泛的应用。

分类　按照工作方式的不同，PDP 主要分为直流型 (DC－PDP，电极与气体直接接触) 和交流型 (AC－PDP，电极用电介质层覆盖) 两大类。根据放电结构的不同，交流型又可分为对向放电型和表面放电型。AC－PDP 具有结构简单、亮度和光效高的优点，是市场上的主流产品。

结构　图 1 和图 2 分别是单色对向放电型和彩色表面放

电型 AC-PDP 的结构示意图。

AC-PDP 的基板上有许多透明的显示电极，当 m 条显示电极 X 和 n 条显示电极 Y 分别位于前、后基板上且互相垂直排列时，就构成了有 $m\times n$ 个放电单元的对向放电型 AC-PDP，放电发生在前、后基板之间 X 与 Y 电极相对的位置。当 X、Y 电极都位于前基板上且平行排列时（此时 $m=n$），后基板上就需要有 k 条寻址电极，构成有 $m\times k$ 个放电单元的表面放电型 AC-PDP，放电发生在前基板的内表面上 X、Y 电极之间且与寻址电极所对应的位置。PDP 的前、后基板间隔约 100μm，四周经气密性封接，内部所充气体是氦、氖、氙的混合气体。单色 PDP 通常直接利用气体放电发出的可见光来实现单色显示，彩色 PDP 则通过气体放电发射出的紫外线照射红、绿、蓝三基色荧光粉，激发荧光粉发光而实现彩色显示。

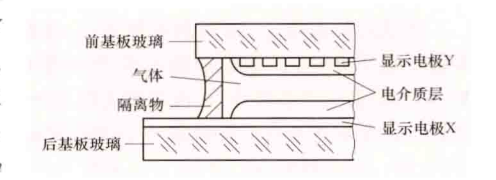


图 1　单色对向放电型 AC-PDP 的结构示意图

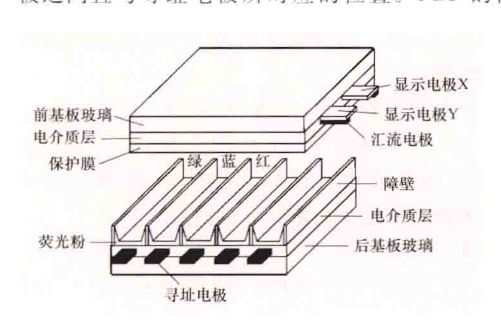


图 2　彩色表面放电型 AC-PDP 的结构示意图

工作原理　AC-PDP 的显示电极 X 和 Y 之间始终加有周期性的维持电压脉冲，其幅度低于单元的击穿电压（又称着火电压），高于单元的熄火电压，使各个放电单元维持原有的熄火或着火状态。若要改变该状态，例如让该单元从熄火状态变为着火状态，可在该单元相应的电极间加一个写脉冲，该单元就放电发光。相反，如果要使已发光的单元停止发光，可在该单元相应的电极之间施加一个擦除脉冲，该单元就停止发光。

特点　PDP 与传统的阴极射线管（cathode ray tube，CRT）显示器相比，具有屏幕大、厚度薄、质量轻的特点。与液晶显示器件相比，PDP 是主动发光而不需要背光源，所以具有视角宽的优点。

发展历史　PDP 起源于 20 世纪 50 年代初美国 Burroughs 公司制作的数码显示管。历史性的突破发生在 1964 年，美国伊利诺伊（Illinois）大学的 Bitzer 和 Slottow 教授制作出具有存储特性的单色 AC-PDP。此后 PDP 不断发展，从单色到彩色，屏幕尺寸也不断扩大，2010 年以来，40～60 英寸彩色 PDP 已经实现了商品化。

diwen yeti dianjiezhi jichuan

低温液体电介质击穿

（breakdown in cryogenic dielectric liquids）　用于低温电工设备中的液体电介质由绝缘状态突变为良导电状态的过程。可用作低温液体电介质的有液氮、液氦和液氢等。

低温液体电介质击穿现象的本质尚未完全掌握，还没有形成能完满地解释各种试验现象的完整理论。对低温液体电介质的击穿机理，有液体电介质电击穿、液体电介质气泡击穿、液体电介质小桥击穿三种解释。

影响低温液体电介质击穿的因素可归纳为三类：液体电介质种类及其状态，电极及其布置，施加电压类型。

（1）液体电介质种类及其状态的影响：与常温下的变压器油相比，除液氦的击穿电压稍低外，液氮、液氢具有同等或稍高的工频击穿电压。因而在低温电工设备中，可按在常温下用变压器油作绝缘的情况来近似地考虑其绝缘距离。低温液体电介质的击穿电压一般随温度的下降而升高，随压力的增大而增加，这是低温液体电介质内气泡形成受阻的结果。杂质严重影响低温液体电介质的击穿电压，低温电工设备中需防止设备用油（如润滑用油）污染液体电介质。在低温液体电介质流动的情况下，杂质集中形成小桥的过程受到阻碍，击穿发展过程受到影响，击穿电压比静止的低温液体电介质的高。

（2）电极及其布置的影响：低温液体电介质的击穿电压与电极材料有关。对不同的低温液体，电极材料的影响亦不同。通常，用硬金属（如不锈钢）作电极时击穿电压最高，而用软金属（如铜或铝）作电极时击穿电压最低。电极表面的粗糙程度对低温液体电介质击穿电压的影响甚大，因此要求低温电工设备中的电极尽可能光滑。随着电极面积的增大，低温液体电介质的击穿电压下降，其面积效应比变压器油的大。随着极间距离 d 的增加，击穿电压与 d^n 成比例增加。指数 n 的数值在 0.5～1 的范围内。

（3）施加电压类型的影响：低温液体电介质的击穿电压与施加的电压类型有关，雷电冲击击穿电压与交流击穿电压之比为 1.5～3.5。在极不均匀电场中，击穿具有极性效应，正极性击穿电压高于负极性击穿电压。这种极性效应与在空气中或变压器油中的情况正好相反。

dili xinxi xitong

地理信息系统

（geographic information system）

一种在计算机软硬件支持下，对整个或部分地球表层（包括大气层）空间中的有关地理分布数据进行采集、储存、管理、运算、分析、显示和描述的技术系统。

地理信息系统处理的对象是多种地理空间实体数据及其关系，包括空间定位数据、图形数据、遥感图像数据、属性数据等。空间数据的最根本特点是每一个数据都按统一的地理坐标进行编码，实现对其定位、定性和定量的描述，这是地理信息系统区别于其他类型信息系统的根本标志。地理信息系统的技术优势在于它的数据综合、模拟与分析评价能力，可以得到常规方法或普通信息系统难以得到的重要信息，实现地理空间过程演化的模拟和预测。

从系统论和应用的角度出发，地理信息系统被分为计算机硬件和系统软件、数据库系统、数据库管理系统、应用人员和组织机构。计算机硬件和系统软件是开发、应用地理信息系统的基础，其中硬件主要包括计算机、打印机、绘图仪、数字化仪，系统软件主要指操作系统；数据库系统完成对数据的存储，包括几何（图形）数据和属性数据库；数据

库管理系统是地理信息系统的核心，完成对地理数据的输入、处理、管理、分析和输出；应用人员是地理信息系统成功应用的关键，而强有力的组织是系统运行的保障。

从数据处理的角度出发，地理信息系统又被分为数据输入子系统、数据存储与检索子系统、数据分析和处理子系统、数据输出子系统。数据输入子系统负责数据的采集、预处理和数据的转换；数据存储与检索子系统负责组织和管理数据库中的数据，以便数据查询、更新与编辑处理；数据分析与处理子系统负责对数据库中的数据进行计算和分析、处理；数据输出子系统以表格、图形、图像方式将数据库中的内容和计算、分析结果输出到显示器或绘图纸上。

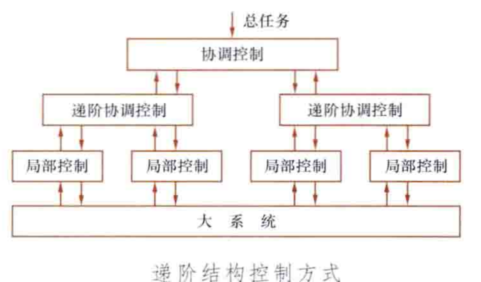
地理信息系统广泛应用于土地利用、资源管理、环境监测、交通运输、经济建设、城市规划以及政府部门行政管理等方面。输配电网地理信息系统可应用于各地电力公司、供电单位生产技术部门及下属供电单位的生产技术部、客户服务中心、线路设备检修部、运行工区、调度中心及计算机信息中心。输配电网地理信息系统利用地理信息技术来对输配电网设备设施的空间分布数据、生产运行数据、电网运行状态等信息进行集中化管理，对电网的网络关系进行分析，并能集成已有的管理信息系统，形成以地理信息为支撑的综合电网管理信息系统。

dijie kongzhi

递阶控制

(hierarchical control) 对递阶结构的大系统所采用的控制方式。它将一个复杂的大系统模型分解成一组低阶模型，每个低阶模型对应于一个子系统，各个子系统中设计对应的局部控制器，用协调级协调控制各个局部控制器，由协调控制和局部控制的共同作用，完成整个系统的控制任务。

图示三级递阶结构控制方式。第一级是局部控制级或最低决策级，它直接控制大系统的各局部过程或对象，构成各局部控制子系统。第二级是递阶协调控制级或中间决策级，它对各局部控制进行协调控制，接受第三级的控制。第三级是协调控制级或最高决策级，它对第二级进行协调控制。根据大系统总控制目标，通过递阶结构控制，完成大系统管理、控制的总任务。



递阶结构控制方式

实现递阶控制的方法主要是分解—协调。分解是把高阶大系统分成若干子系统，用通常的最优化方法实现子系统的最优化。协调是在分解后的各子系统局部最优化的基础上，使总目标函数极小化，实现大系统的全局最优化。

ditui zuixiao ercheng guji

递推最小二乘估计

(recursive least squares estimation) 用新的观测值，对原来 k 时刻的最小二乘估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 作适当的修正，以获得 $(k+1)$ 时刻的最小二乘估计值的数学估计方法。递推最小二乘估计可减少计算量，并可及时修正随时间变化的系统参数，在动态系统的在线参数估计中，获得广泛的应用。

系统的阶次为 n，由观测次数为 N 的数据获得的最小二乘估计记作 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(N)$；相应的输出值和观测值矩阵记作 $\boldsymbol{Y}(N)$，$\boldsymbol{X}(N)$（见最小二乘估计）；由观测次数为 $N+1$ 的数据获得的估计，记作 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(N+1)$；每增加一个观测对 $\boldsymbol{u}(N+1)$，$y(n+N+1)$ 时，相应的 $\boldsymbol{X}(N)$，$\boldsymbol{Y}(N)$ 也增加了一个分量，即成为

$$\boldsymbol{Y}(N+1)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y}(N)\\ \cdots \\ y(n+N+1)\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{X}(N+1)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}(N)\\ \cdots \\ \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n+N+1)\end{bmatrix} \tag{2}$$

其中

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n+N+1)=[-y(n+N),\cdots,-y(N+1),u(n+N+1),\cdots,u(N+1)] \tag{3}$$

与最小二乘估计一样，由观测次数为 $N+1$ 的数据获得 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 的最小二乘估计为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(N+1)=[\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(N+1)\boldsymbol{X}(N+1)]^{-1}\times\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(N+1)\boldsymbol{Y}(N+1)] \tag{4}$$

经推导并将 N 改为常用符号 k，记 $\boldsymbol{P}(k)=[\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(k)\times\boldsymbol{X}(k)]^{-1}$，可得下述递推最小二乘估计公式为

$$\boldsymbol{K}(k+1)=\boldsymbol{P}(k)\boldsymbol{x}(k+1)\times[1+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)\boldsymbol{P}(k)\boldsymbol{x}(k+1)]^{-1} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{P}(k+1)=[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}(k+1)\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)]\boldsymbol{P}(k) \tag{6}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)+\boldsymbol{K}(k+1)\times[\boldsymbol{y}(k+1)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)] \tag{7}$$

式(7)表示新的参数估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1)$ 等于老的参数估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 加修改项 $\boldsymbol{K}(k+1)[\boldsymbol{y}(k+1)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)]$。其中 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 表示基于 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 和观测值 $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)$ 对输出 $\boldsymbol{y}(k+1)$ 的预测。所以，$[\boldsymbol{y}(k+1)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)]$ 表示 $(k+1)$ 时刻输出的预测误差，$\boldsymbol{K}(k+1)$ 是对预测误差的加权矩阵。

递推初值可以用下述方法选择：

（1）可以先取一批观测值，$k>2n$（n 为系统的阶），用最小二乘估计值 $\boldsymbol{\theta}$ 作为初值，即

$$\boldsymbol{P}_0=\boldsymbol{P}(k)=[\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{X}(k)]^{-1}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_0=[\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{X}(k)]^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{Y}(k)$$

（2）令 $\boldsymbol{P}_0=a^2\boldsymbol{I}$，$a^2$ 为数值很大的标量，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵，$\hat{\boldsymbol{\theta}}_0$ 为任意值。

disidai yuyan

第四代语言

(fourth generation language，4GL)

见程序设计语言。

dianbiao zhunque jibie

电表准确级别

(accuracy class of electrical meters)

表示在规定的工作条件下，指示电表标度尺工作部分的基本误差限，即最大允许引用误差。电表基本误差的计算公式为 $\gamma=\dfrac{A_x-A_0}{A_m}\times100\%$，式中 A_x 为被检表的示值；A_0 为标准表的示值；A_m 为标度尺工作部分的上量限。

对于以电角度定度的相位表，其基本误差 $\Delta\varphi$ 按下式计

算：$\Delta\varphi=\varphi_x-\varphi_0$，其中$\varphi_x$为被检相位表的示值（电角度）；$\varphi_0$为标准相位表的示值（电角度）。

中国电表的准确级别分七级：0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0级。它们与基本误差限的关系见表。

中国电表的准确级别和基本误差限

电表准确级别	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差限(%)	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0	±1.5	±2.5	±5.0

电表标度尺工作部分是指示值误差保证在允许误差以内的标度尺的那一部分。

对于可测量不同被测对象和不同电流种类的多用电表，其对应不同被测对象及不同电流种类，可有不同的准确级别；对测量同一种量的多量程电表，其不同量程也可有不同准确级别。

dianchang qiangdu

电场强度

（electric field intensity）　描述电场大小和电场方向的基本特征的一个物理量，它等于放置于观察点的静止的正检验电荷所受到的力与电荷的比值。令 q 是电量极小的正检验电荷，$\boldsymbol{F}$ 是 q 受到的力，则

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q}$$

电场强度是矢量，单位是伏特每米（V/m）。一般情况下，$\boldsymbol{E}$ 是时间和空间的函数。

电场强度与电荷的关系　如果已知电场中的电荷分布规律，特别是当电荷的分布集中在某一很小区域内，而待求点的位置与该区域的距离远大于电荷分布区域的线度时，可把带有电荷量 q 的电荷看作点电荷，点电荷所在处称为源点，根据库仑定律可得出真空中某点（称为场点）的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 为

$$\boldsymbol{E}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\boldsymbol{r}^0$$

式中ε_0是真空电容率，$\varepsilon_0\approx8.85\times10^{-12}$ F/m；$\boldsymbol{r}^0$ 是从源点指向场点的单位矢量。空气的电容率与ε_0十分接近。如空气中还有其他形式的电荷分布（线、面或体分布），利用线性介质中场的叠加性，通过矢量积分可求出相应的电场强度 $\boldsymbol{E}$。

电场线　电场可用电场线形象地描述其分布。电场线是一条曲线，上面任一点处的切线方向规定为该点电场强度 $\boldsymbol{E}$ 的方向。作电场线图形时，常使垂直于 $\boldsymbol{E}$ 的单位面积上所穿过的电场线的根数，正比于该点电场强度的大小。在静电场中，电场线起始于正电荷，终止于负电荷，既不闭合、中断，也不相交。根据按上述原则描绘出的静电场的电场线分布图像，很容易判断出电场的强弱分布。电场线密集处的电场强度数值必大于电场线稀疏处的电场强度的数值，如图1、图2所示。

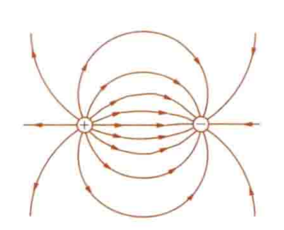


图1　等量异号点电荷之间的电场线

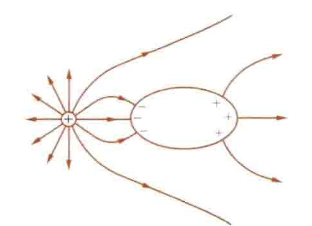


图2　正电荷与导体之间的电场线

击穿与局部放电　当静电场中某处电场强度的量值大到某一程度时，将使该处周围绝缘材料产生电离而放电。放电持续发展到整个绝缘间隙，在绝缘材料中形成良好的导电通路，使绝缘击穿。相应的电场强度叫做该绝缘材料的击穿电场强度。干燥空气的击穿电场强度约为 3×10^6 V/m。在不均匀电场中，如高压输电线表面的电场强度达到这个数值后，紧邻导线表面的空气层中开始局部放电，称电晕放电。由于输电线间的电场为不均匀电场，一般说来，局部区域的电晕放电不至于继续延伸至另一导体表面而造成击穿，但是局部区域的电晕放电增加了输电线路的电力损耗，干扰附近通信线路，且危害附近的绝缘设备。随着超高压输电线路的投入运行，为了减少线路电晕放电带来的不良后果，工程上采用把具有同一电位的导线分裂成两根或更多根导线的方法使每根导线表面的电场强度明显下降，从而减少或避免电晕放电。这样的输电线路称为分裂导线输电线路。

dianchutou cailiao

电触头材料

（electric contact materials）　用于制造继电器、接触器和断路器等的电触头的材料，又称触头材料。对这类材料的要求是：体积电阻率低；硬度适中；能承受较大的接触压力以减小接触电阻；化学性质稳定，表面不易生成各种化合物；耐电弧性能好，触头分合时产生的由放电引起的磨损变形小（在电弧放电过程中，触头材料发生从正端到负端或从负端到正端的材料转移现象称为放电引起的磨损变形）。此外，还应尽量选用高熔点或升华材料，以防止在触头闭合时由于高温而导致熔焊。

常用的电触头材料有银合金、金合金、铂、钯、钨及其合金、碳化钨、碳及铜合金等。

银合金触头　银的导电性好，除了易硫化外，化学稳定性好。硫化银对触头的接触电阻影响很小，因此是较好的触头材料。银的熔点仅 960℃，硬度也不够高，银触头在分合时易产生磨损或熔焊，在银中添加少量其他金属或金属氧化物可使其性能得到改善。

（1）GS 合金（CP3 合金）：在银中添加 10%金，以提高硬度，减少磨损量，防止触头表面硫化。但这种合金价格较贵，仅用于要求高的仪器设备中。

（2）Ag－CdO 合金：在银中添加 10%～13%氧化镉（CdO），利用 CdO 在 900℃时升华的特性可防止熔焊。这种触头的容量可达几十安培。

（3）Ag－PbO 合金：在低气压场合使用时，常添加少量氧化铅（PbO）。如应用于航空仪表等。

金合金触头　含金 69%、银 25%、铂 6%的合金称为 1 号合金，代号 CP1。它的表面不会氧化，接触电阻稳定性极好。但应防止放电时有害气体所生成的化合物导致触头表面污染。一般用于仪器设备。

铂、钯触头　铂的化学稳定性极好，产生短电弧所需的最小放电电流 I_{min} 达 9A。但因价格昂贵，极少应用。通常可以钯代铂，性能虽略次于铂，但加工性能优良，价格适中，适用于制造干簧继电器。

钨及其合金触头　钨的熔点高，耐弧性能好，但表面易生成氧化层，使用时应施加足够的压力，最好用于电压较高的场合。

钨银、钨铜烧结合金，含钨量为50%～70%，耐电弧性能极好，适用于大电流回路。

碳化钨、银烧结合金，耐电弧性能好，适用于大电流回路。

碳触头　碳的升华性能好，能抗熔焊。但由于纯碳触头的接触电阻大，通常将它和银混合，烧结后使用。

铜合金触头材料　铜铋（Cu-Bi）合金和铜碲硒（Cu-Te-Se）合金用于10kV及以下的真空开关灭弧室用触头材料，铜铬（Cu-Cr）合金用于10kV以上的真空开关灭弧室用触头材料。

dianci

电瓷　（electric ceramic）　作电气绝缘用的陶瓷。主要分普通电瓷和特种电瓷两大类。

普通电瓷　一般指长石质瓷，由黏土、石英、长石以约2∶1∶1的比例配合，经制泥、成型、干燥、上釉、烧制（1200～1350℃）等工序制成。由于原料来源丰富、价格低廉，能制成大型制品，又具有较好的电气绝缘性能、力学性能、热性能、化学稳定性和耐气候性等特点，在电力系统和电气设备的高低压绝缘中获得广泛应用。普通电瓷用于制作悬挂导线的悬式绝缘子，对带电导体起绝缘和支承作用的支柱绝缘子，将电流引入或导出电气设备、穿过建筑物等用的套管绝缘子（见图）。为适应制造高强度绝缘子和套管的需要，发展了高强度瓷，它是在长石质瓷组分中加入较多石英制成的高硅质瓷，也有的用煅烧矾土或工业氧化铝部分（或全部）取代石英制成的高铝质瓷。



500kV高压油纸电容式变压器套管

特种电瓷　一般指电子工业及其他特种用途的绝缘陶瓷，常用的有氧化铝瓷、滑石瓷、氧化铍瓷、氮化硼瓷、氮化硅瓷和介质陶瓷等。

氧化铝瓷　主要由刚玉（$\alpha-Al_2O_3$）晶体组成，具有良好的常温和高温电气绝缘性能、机械性能和化学稳定性能。氧化铝含量愈多，性能愈好，但制造也愈困难。氧化铝瓷广泛用于制造内燃机火花塞绝缘子、超高频大功率电真空器件的绝缘零件、电子管及整流器管壳、集成电路基片等。

滑石瓷　主要由滑石的高温分解物原顽辉石（$MgO \cdot SiO_2$）晶体组成，其特点是高频性能好，价格低廉。广泛用作高频绝缘子、绝缘管和线圈骨架等。

氧化铍瓷　主要由氧化铍（BeO）晶体组成，其特点是导热率特大、耐热冲击性在陶瓷中最佳，且高频介电性能稳定，可用作大功率晶体管的管壳、管座、散热片、集成电路基片等。活性氧化铍有毒，生产上需采取特种防护措施。

氮化硼瓷　主要由氮化硼（BN）晶体组成，其特点是高温绝缘电阻大，微波介质损耗小，机械加工性好，可车削加工，可用作高频绝缘材料、晶体管和集成电路的散热板、微波输出窗等。

氮化硅瓷　主要由氮化硅晶体（Si_3N_4）组成，其特点是具有优异的机械强度、化学稳定性和高温绝缘性能，主要用作高温电气绝缘材料。

介质陶瓷　包括钛酸盐、锆酸盐、锡酸盐、铌酸盐、钨酸盐等组成的品种繁多的陶瓷，它们是电绝缘的，但主要是利用这些材料晶体结构的特殊性产生的高的电容率来制造各种陶瓷电容器，如金红石（TiO_2）陶瓷，钛酸钡（$BaTiO_3$）陶瓷，其电容率分别为80和几千到几万，可制成各种用途的陶瓷电容器和其他电子元器件。

diancibo

电磁波　（electromagnetic wave）　在空间传播的时变电磁场。它的传播速度为光速。无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、γ射线和宇宙射线都是电磁波，但它们的频率不同并依次由低至高，或波长依次由长至短（见图1）。

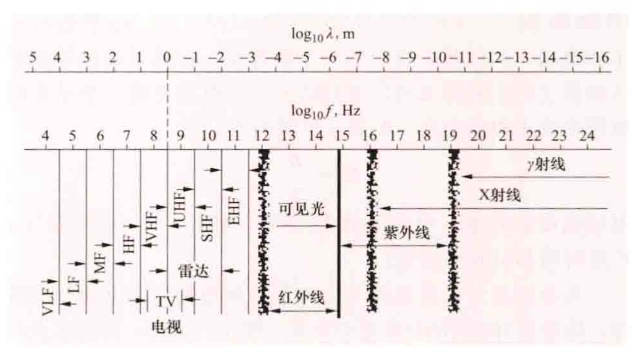


图1　电磁波谱

VLF—甚低频；LF—低频；MF—中频；HF—高频；VHF—甚高频；UHF—次高频；SHF—超高频；EHF—极高频

在电容率ε、磁导率μ、电导率γ均为常量的均匀介质中，对于没有自由电荷、传导电流的无源区，根据麦克斯韦方程组，可得电场强度**E**和磁场强度**H**均满足广义波动方程

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} - \mu\gamma \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \boldsymbol{H} - \mu\gamma \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \boldsymbol{H}}{\partial t^2} = 0$$

式中t为时间。该方程的解答为波的形式，即场量**E**、**H**以波的形式传播。

沿x方向传播的一维正弦电磁波　若选择y轴与电场强度方向一致，则电场强度只有y分量E_y，磁场强度只有z分量H_z。这种电磁波是一种平面电磁波。令v是沿x方向的传播速度，λ是波长，β是相位常量，ω是角频率，则$v=\omega/\beta$，$\lambda=2\pi/\beta$。当波在传播过程中遇到两种介质的交界面时，将发生波的反射、折射现象。

理想电介质中的正弦电磁波　此时$\gamma=0$，有

$$E_y = E_m \sin(\omega t - \beta x)$$

$$H_z = H_m \sin(\omega t - \beta x)$$

式中ω为角频率，$\omega=2\pi f$，f为频率；β为相位常量，且$\beta=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}$。波的振幅无衰减，波形见图2。任意瞬时电场强度振幅与磁场强度振幅的位置总是重合在一处的，各处的电场能量密度等于磁场能量密度。

良导体中的衰减正弦电磁波　忽略位移电流时

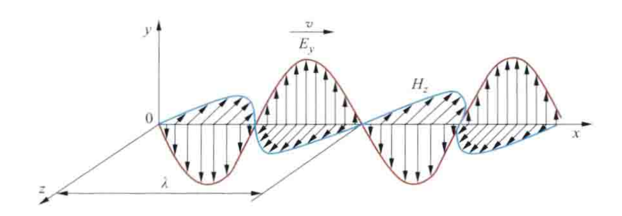


图 2　理想电介质中沿 x 方向传播的一维正弦电磁波

$$E_y = E_m e^{-\alpha x}\sin(\omega t - \beta x)$$

$$H_z = H_m e^{-\alpha x}\sin\left(\omega t - \beta x - \frac{\pi}{4}\right)$$

式中 $\beta = \sqrt{\omega\mu\gamma/2}$，波的振幅沿传播方向衰减；$\alpha$ 为衰减常量，$\alpha=\beta$；H_z 滞后于 E_y 的相角为 $\pi/4$。

有损耗线性电介质中的衰减正弦电磁波　这属于一般情况，此时

$$E_y = E_m e^{-\alpha x}\sin(\omega t - \beta x)$$

$$H_z = H_m e^{-\alpha x}\sin(\omega t - \beta x - \theta)$$

式中
$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left(\sqrt{1+\frac{\gamma^2}{\omega^2\varepsilon^2}}-1\right)}$$

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left(\sqrt{1+\frac{\gamma^2}{\omega^2\varepsilon^2}}+1\right)}$$

θ 是一常量。波形如图 3 所示。任意瞬时电场强度振幅与磁场强度振幅的位置不重合。

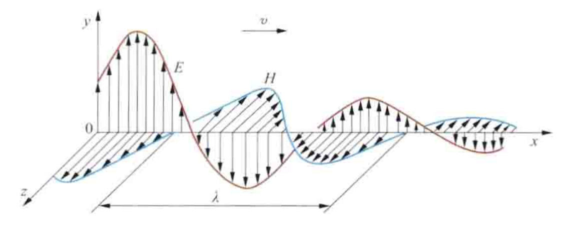


图 3　有损耗电介质中沿 x 方向传播的一维衰减正弦电磁波

极化波　在无线电工程中，常遇有不止一个同频率正弦电磁波沿同一方向传播，而且在传播方向上无电场分量，即电场强度矢量在与波前进方向相垂直的平面内（见图 2 和图 3）。在与波前进方向垂直的任一平面内合成电场矢量末端对时间的轨迹可分为几种不同的情况：①直线；②圆；③椭圆。对应的波分别称为线极化波、圆极化波、椭圆极化波。

dianci celiang

电磁测量

（electromagnetic measurements）　对表征电和磁的各种物理量的测量。在电力产生和电工制造领域，广泛用于检查或确定系统、设备、元器件、材料等的工作状况和性能。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“电磁测量”部分。

参考书目

唐统一，张钟华，张叔涵．近代电磁测量．北京：中国计量出版社，1992.

唐统一，赵伟．电磁测量．北京：清华大学出版社，1997.

diancichang

电磁场

（electromagnetic fields）　以电场强度和磁通密度表征的一种物理场。电磁场具有能量、动量和质量，它是一种特殊形式的物质。物理学中的场，是指空间每一点被赋予的物理量的全体。对电磁场来讲，空间各处的电场强度、磁通密度都是矢量，所以电磁场是矢量场。电磁场对电荷、电流有作用力，这种性质被用来制造电动机、机械式指示电表、粒子加速器等。导体在磁场中运动能激起感应电动势并可以产生电流，这种性质被用来制造发电机、磁流体发电装置等。电磁场能够以波的形式在空间传播，这种性质被用来制造广播、电视、无线电通信设备等。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“电磁场”部分。

参考书目

雷银照．电磁场．2 版．北京：高等教育出版社，2012.

diancichang shuzhi jisuan

电磁场数值计算

（numerical computation of electromagnetic fields）　用数值分析方法求解电磁场定解问题。电磁场定解问题由描述电磁场变化规律的麦克斯韦方程组、介质的本构关系、场域边界条件以及初始条件组成。不含有初始条件的定解问题称为边值问题。除了一些典型场域外，边值问题一般难以解析求解。用数值计算方法计算电磁场定解问题的步骤：根据给定的场域形状、尺寸、介质性质、边界条件以及初始条件，列出电磁场定解问题；然后选用合适的数值方法实施场域剖分和时间离散，在此基础上将定解问题离散为代数方程组；进而通过求解代数方程组，得到定解问题的近似数值解。常用的数值计算方法有：有限差分法、有限元法、边界元法、矩量法等。还有一种用于数值求解静电场问题的模拟电荷法，它的特点是在电极内部选取适当位置放置一定数量的假想电荷，用这些电荷产生电场的叠加近似代替实际的电场分布。

已有一些电磁场数值计算的商用软件，可以快速计算常见的典型问题，而且后处理功能也很强大。

下面以求解平行平面静电场中的电位为例，分别简述有限差分法和有限元法的计算方法。

有限差分法　将方程中的微商以差商代替用于近似求解定解问题的一种数值计算方法。将场域 S 剖分为许多小网格单元（见图），单元顶点称为网格节点。用各节点上电位的差商近似表示电位在该点的偏导数，从而将偏微分方程转化为代数方程组，由此进一步求得各离散点上的电位。

场域中电位 φ 的分布可以通过求解下面边值问题得到。电位的泊松方程（见拉普拉斯方程）是

$$\nabla^2\varphi = f$$

边界条件是

$$\begin{cases} \varphi|_{l_1} = V_1 \\ \varphi|_{l_2} = V_2 \\ \left.\dfrac{\partial\varphi}{\partial n}\right|_{l_3} = 0 \end{cases}$$

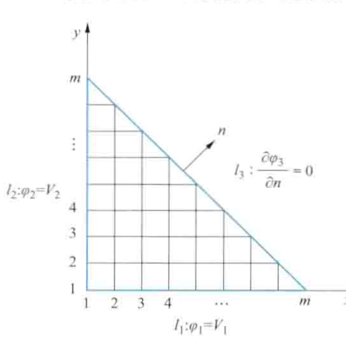
其中 $f=-\rho/\varepsilon$，ρ 为已知电荷密度，ε 为电容率；V_1 和 V_2 均为已知电位；$l_1+l_2+l_3$ 构成场域边界，其中 l_3 是场的对称线；$\partial\varphi/\partial n=\boldsymbol{n}\cdot\nabla\varphi$，$\boldsymbol{n}$ 是l_3上的单位法向矢量。图中细线将场域剖分为许多边长相同的正方形网格，网格边长是 h，靠近对称线l_3的网格是等边三角形；粗线是场域边界，边界上的电位已知，对称线上电位的法向导数为零。利用差分，上面的泊松方程在节点（i，j）处可以近似表示为

$$\varphi(i+1,j)+\varphi(i-1,j)+\varphi(i,j+1)+\varphi(i,j-1)-4\varphi(i,j)=h^2 f(i,j)$$

对于场域内的每一个网格节点均可列出一个这样的差分方程，方程的总个数与场域内部节点总数相等。将全部节点对应的差分方程联立，并把边界上的已知值代入方程组，数值求解该方程组，就可以求得各节点上的电位。

有限差分法多用于边界形状比较规则的场域，计算程序简单，精确度也比较容易控制。

有限元法　以变分原理为基础，将边值问题的求解转化为泛函的极值问题的一种数值计算方法。将场域 S 剖分为许多网格单元，将各单元上的电位用其周围节点上的电位近似插值表示，这样将泛函求极值问题转化为普通多元函数的极值问题，从而得到以网格节点上的电位为待求量的代数方程组，由此解得各节点上的电位。有限元法的独特优点是：场域的网格剖分灵活，可以根据场函数的需要自如地设置节点，因而对区域形状有较大的适应性；可以编制出通用的计算程序；有比较完善的数学基础。



场域及离散网格

上述电位边值问题对应于下列泛函 $J(\varphi)$ 的极小值函数

$$\begin{cases} J(\varphi)=\int_S\left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2+2\varphi f\right]\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \\ \varphi|_{l_1}=V_1,\ \varphi\Big|_{l_2}=V_2,\ \frac{\partial\varphi}{\partial n}\Big|_{l_3}=0 \end{cases}$$

若将场域 S 划分为三角形单元网格，任一单元 e 上的电位函数用其三个顶点上的电位线性插值近似表示，由此可得泛函的近似形式为

$$J(\varphi)=\sum_{e=1}^{k}J_e(\varphi)\approx\frac{1}{2}\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\varphi}$$

式中 k 为三角形单元总数；J_e为单元上的泛函；$\boldsymbol{\varphi}$ 为由各节点电位所组成的列向量；$\boldsymbol{K}$ 为由全部剖分单元的刚度矩阵所形成的合成矩阵。这样，便将泛函转化成了一个多元函数，其自变量为各节点电位。求该多元函数的极值，可得到线性代数方程组

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{\varphi}=\boldsymbol{0}$$

结合已知的电位边界条件求解该线性方程组，便可以求得各节点上的电位。

dianci fushe

电磁辐射

（electromagnetic radiation）　电磁场能量以波的形式向周围空间发射电磁波的现象。按电磁波的频率由低到高（即波长由长到短），电磁辐射可分为无线电辐射、红外辐射、可见光辐射、紫外线辐射、X 射线辐射、γ 射线辐射及宇宙射线辐射等。

在无线电工程中，常用的电磁辐射器是发送天线。对真空或空气中按交变电流变化的电偶极子（由直导线段与两圆球组成，见图 1）所产生的电磁场，在远区（即观察点与电偶极子间距离 r 远大于波长 λ 的区域）的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 分别为

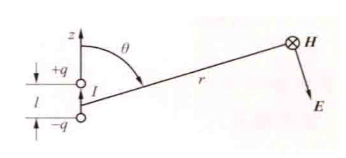


图 1　电偶极子

$$\boldsymbol{E}=\frac{l}{4\pi\varepsilon_0 c^2}\frac{q''(t-r/c)}{r}\sin\theta\,\boldsymbol{\theta}^0$$

$$\boldsymbol{H}=\frac{l}{4\pi c}\frac{q''(t-r/c)}{r}\sin\theta\,\boldsymbol{\alpha}^0$$

这里采用球坐标（r，θ，α）。q 为电偶极子的电荷；l 为电偶极子的长度；$q''(t-r/c)$ 为对变量（$t-r/c$）的二阶导数；t 为时间；c 为电磁波传播速度（光速）。该式表明，在观察点处 t 时刻的场量与以前（$t-r/c$）时刻的电荷 q 的二阶导数有关；场量与 r 均成反比关系。电场强度与磁场强度的比值为常量，即波阻抗 Z_c，且

$$Z_c=\frac{E}{H}=\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\approx 377\ \Omega$$

电场能量密度等于磁场能量密度。

正弦交变电流电偶极子的辐射功率 P 为

$$P=80\pi^2\left(\frac{Il}{\lambda}\right)^2$$

式中 λ 为波长，$\lambda=c/f$，f 为频率；I 为电偶极子的电流有效值。等效辐射电阻为

$$R=\frac{P}{I^2}=80\pi^2\left(\frac{l}{\lambda}\right)^2$$

辐射电阻的大小可用来表示辐射能力的强弱。当电源频率较高即波长 λ 较短时，可使用 l 较短的天线辐射功率。

真空或空气中交变电流磁偶极子亦可辐射电磁波，如载有交流电流的线匝，见图 2。设线匝所限定的面积为 S，线匝中电流为 i，则远区电场强度 $\boldsymbol{E}$ 与磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 分别为

$$\boldsymbol{E}=\frac{\mu_0 S}{4\pi c}\frac{i''(t-r/c)}{r}\sin\theta\,(-\boldsymbol{\alpha}^0)$$

$$\boldsymbol{H}=\frac{S}{4\pi c^2}\frac{i''(t-r/c)}{r}\sin\theta\,\boldsymbol{\theta}^0$$

实际的线天线的电磁场可以看成许多电偶极子所产生电磁场的叠加。将许多天线组合后还可以构成天线阵，调整天线间的相对位置、电流的幅值和相位可以获得所需的方向特性。

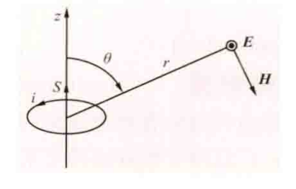


图 2　磁偶极子

dianci ganrao

电磁干扰

（electromagnetic interference）　电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的降低。是电磁骚扰引起的后果。

1990年以前，没有将电磁现象以及引起的后果区别开来，统称电磁干扰。1990年以后，国际电工委员会对这种区别做出界定。用电磁干扰描述电磁现象引起的后果。用电磁骚扰描述电磁现象的程度，即引起电磁干扰的原因。

电磁干扰的形成　主要取决于电磁敏感对象的行为，即电磁敏感对象是否因接受到来自电磁骚扰源的电磁能量而出现异常。需要围绕电磁兼容三要素进行分析，即对电磁骚扰源、电磁耦合途径、电磁敏感对象进行分析，找出电磁干扰形成的主要原因，以采取有效的抗干扰措施。对于很多复杂的电磁干扰问题，其形成的原因不总是单一的，而是多方面的，需要围绕三个要素同时查找。

电磁干扰的危害　主要有：①降低设备或系统性能。降低信噪比，在电磁骚扰甚强或有用信号微弱时，甚至可使信号淹没在噪声之中而难于检测，或使信号遗失、出错，导致通信质量降低、测量误差增大等。②损坏元件或设备。可以损坏元件或设备，或降低元件或设备工作寿命，严重时可以造成元件或设备的永久性损坏。③使设备产生功能错误。如造成电力系统继电保护和自动装置的拒动或误动等，进而导致电力系统的更大故障等危害。④引起生态效应。一般认为其效应可分为热效应与非热效应两类。强电磁环境可能对生物体造成的生物影响不仅仅反映在个体级、器官级，还可能影响到细胞级。⑤引起灾害。如雷击、静电放电可能导致火灾、爆炸、弹药引爆等。

电磁干扰的防护　主要围绕电磁兼容三要素展开。基本原则是，降低电磁骚扰源的发射水平，减少电磁耦合途径的耦合程度、增强电磁敏感对象的抗扰度。对于传导耦合的电磁骚扰，可以在电路中使用滤波器、隔离变压器、磁环、光电耦合器、浪涌抑制器、接地等措施进行抑制。对于场耦合的电磁骚扰，除增加电磁骚扰源与电磁敏感对象的距离、改变它们之间的方位、合理布线等措施外，还可以根据电磁骚扰源的电场、磁场或电磁场属性而分别采用静电屏蔽（见静电感应、电磁屏蔽）、磁屏蔽（见电磁屏蔽）和电磁屏蔽进行抑制。对于一些特殊问题，还可以通过错开电磁骚扰源与电磁敏感对象的工作时间以达到时间分离。

电磁干扰的研究方法　可以采用数值预测和物理模拟的方法。数值预测方法是通过建立电磁耦合的数学模型，利用计算机数值计算，研究电磁干扰的耦合机理。物理模拟是在特定的试验环境内，应用典型电磁骚扰信号发生器和电磁耦合装置，将电磁骚扰耦合作用到电磁敏感对象上，在实验室再现电磁干扰现象，通过试验手段，研究电磁干扰的形成机理及防护措施。

dianci ganying

电磁感应

（electromagnetic induction）　穿过回路所限定曲面的磁通量发生变化时，在回路中产生电动势的现象。这样产生的电动势，称为感应电动势。

图1中，S是由回路l所限定的曲面，Φ是穿过曲面S的磁通量。若回路为导电回路，该电动势将产生感应电流。电磁感应现象由英国物理学家M. 法拉第（M. Faraday，1791—1867）于1831年发现。发电机、变压器等重要电工设备即据此现象制成。

电磁感应定律　当穿过导电回路所限定曲面的磁通量发生变化时，在该导电回路中就会产生感应电动势及感应电流。感应电动势e的大小$|e|$正比于磁通量的时间变化率，其实际方向可由楞次定律决定。楞次定律指出：感应电动势的方向是企图产生一个电流，这个电流的作用抵制原来磁通量的变化。如果规定感应电动势的参考方向与该回路相交链的磁通量Φ的参考方向成右手螺旋关系（如图1），则电磁感应定律可表示为

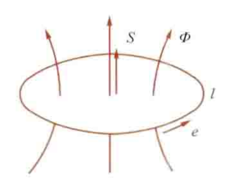


图1　感应电动势的产生

$$e=-\frac{d\Phi}{dt}=-\frac{d}{dt}\int_S \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{S}$$

式中t为时间；$\boldsymbol{B}$为磁通密度；S为由回路l所限定的曲面；$d\boldsymbol{S}$是面元。对于多匝紧密绕制的线圈，有

$$e=-N\frac{d\Phi}{dt}=-\frac{d\Psi}{dt}$$

式中N为匝数；Φ为每匝交链的磁通量；$\Psi=N\Phi$是磁链。在国际单位制（SI）中，感应电动势的单位为伏［特］（V），磁通量的单位为韦［伯］（Wb），时间的单位为秒（s），磁通密度单位为特［斯拉］（T），面积单位为平方米（m^2）。

不同情形下回路中的感应电动势　按回路中磁通量的变化方式区分，有以下三种情形。

导电回路的全部或一部分在恒定磁场中运动　此时，可以形象地想象成导体切割磁场线。任一闭合导电回路中的感应电动势e为

$$e=-\frac{d\Psi}{dt}=\oint_l(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot d\boldsymbol{l}$$

式中l为导电回路；$\boldsymbol{v}$为长度元的运动速度；$\boldsymbol{B}$为$d\boldsymbol{l}$处的磁通密度（图2）。电气工程中的直流发电机就是依据此规律设计、制作的。因而，这种由导线运动引起的感应电动势称为发电机电动势。

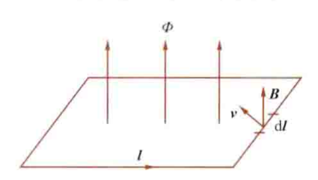


图2　发电机电动势的产生

导电回路不运动、磁通密度随时间变化　此时，回路中的感应电动势e为

$$e=-\frac{d\Psi}{dt}=-\int_S\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}\cdot d\boldsymbol{S}$$

式中S为回路l限定的面积；$\boldsymbol{B}$为面元$d\boldsymbol{S}$处的磁通密度。电气工程中的变压器就是依据此规律工作的。因而，这种由磁场随时间变化所引起的感应电动势称为变压器电动势。

导电回路的全部或一部分在时变磁场中运动　此时，回路中感应电动势为发电机电动势和变压器电动势的叠加，即

$$e=-\frac{d\Psi}{dt}=\oint_l(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot d\boldsymbol{l}-\int_S\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}\cdot d\boldsymbol{S}$$

电磁感应定律的推广　麦克斯韦把电磁感应定律推广到非导电回路的场合，回路可在电介质中，也可在真空中。在任何介质中，沿闭合回路l的感应电动势e等于感应电场强度$\boldsymbol{E}_i$沿该回路的积分，即

$$e=\oint_l\boldsymbol{E}_i\cdot d\boldsymbol{l}$$

于是

$$\oint_l\boldsymbol{E}_i\cdot d\boldsymbol{l}=\oint_l(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot d\boldsymbol{l}-\int_S\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}\cdot d\boldsymbol{S}$$

一般而言，感应电场的出现将引起导体中自由电荷的运动和积累（如导体表面积累自由电荷）。这样，将伴随有库仑电场强度 $\boldsymbol{E}_s$。合成电场强度 $\boldsymbol{E}$ 为

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{E}_s+\boldsymbol{E}_i$$

由于库仑电场具有无旋性，即

$$\oint_l \boldsymbol{E}_s \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=0$$

这样，合成电场强度 $\boldsymbol{E}$ 满足

$$\oint_l \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=\oint_l(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}-\int_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

该式的微分形式是

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=\nabla\times(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})-\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

在静止介质中，介质运动速度为零，即

$$\oint_l \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=-\int_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

该式的微分形式是

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

它是麦克斯韦方程组中的一个方程。

dianci huanjing

电磁环境 （electromagnetic environment） 存在于给定空间所有电磁现象的总和。其中，所有电磁现象包括全部时间和全部频谱的电磁现象。这里描述的电磁现象包含自然的电磁环境和人为的电磁环境，其存在形式既可是导体中的电压和电流，也可是空间中的电场、磁场和电磁场（电磁波）。

自然的电磁环境包括自然界的宇宙射线、银河系的电磁噪声、太阳系的电磁扰动、大地磁场、大地电场和雷电等在地球上的各个区域产生的电磁环境。人为的电磁环境包括与人类生产和生活关系密切的各类电气与电子设备工作时在其所处区域产生的电磁环境，如工业与医疗设备、输变电系统与配电网、电牵引系统、广播电视发射系统、无线通信系统、导航定位系统、电动工具、电器照明、家用电器、信息与办公自动化设备、电力电子设备、电冶金设备等。此外，人为的电磁环境还包括为达到某种目的而人为制造的强电磁环境，如在军事领域的电子战设备和电磁脉冲炸弹等在特定区域产生破坏或干扰敌方电子设备的强电磁环境。

在电磁兼容技术中，一般常用电磁骚扰水平描述电磁环境。当某一区域的电磁骚扰水平很高时，说明该区域的电磁环境十分复杂与恶劣，严重时将导致工作于该电磁环境的人员和设备受到电磁损伤或电磁干扰。因此，限制各类区域的电磁骚扰水平，对于保护在该区域电磁环境内工作的人员与设备是十分必要的。按照国际电工委员会的规定，将电磁环境分为农村居民区、城市居民区、商业区、轻工业区、重工业区（含发电厂与变电站）、交通区、通信中心和医院八类区域。对于各类区域，国际标准或国家标准均以端口电磁骚扰水平的形式给出了各类区域的电磁环境的指标，以将电磁环境纳入到科学监管的范围。

现代电力系统是由各类强电与弱电设备组成的复杂系统，其发电、输电、配电、用电等各个环节运行时均会产生影响各自区域的电磁环境。对于110kV及以上电压等级的电力设施建设前期，需要通过环保部门的环境影响评价。以输电线路为例，中国国家相关标准规定了电磁环境的指标限值，包括工频电场、工频磁场、无线电干扰和可听噪声等。DL/T 5092—1999《110kV～500kV架空送电线路设计技术规程》的第16.0.5条规定，500kV输电线路跨越非长期住人的建筑物或邻近民房时，房屋所在位置离地1m处最大未畸变电场的电场强度不得超过4kV/m，推荐应用国际非电离辐射防护委员会关于对公众全天曝露的工频磁场的磁通密度限值为0.1mT。GB 15707—1995《高压交流架空送电线无线电干扰限值》规定，对于110kV高压交流架空输电线路，在距边相线投影20m处测试频率为0.5MHz的条件下，无线电干扰的电场强度不大于200μV/m（等同于工程中常采用的1μV/m为基准的46dB）。

dianci jianrong

电磁兼容 （electromagnetic compatibility，EMC） 设备或系统在其所处的电磁环境中能正常工作，且不对所处环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。当用Electromagnetic Compatibility一词描述一门学科、一个领域、一个技术范围时，多译为电磁兼容；当用Electromagnetic Compatibility一词表征设备或系统的性能参数时，多译为电磁兼容性。电磁兼容还有其他表述方法。例如，设备或系统在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态，即：①设备或系统在预定的电磁环境中运行时，可按规定的安全裕度实现设计的工作性能，且不因电磁干扰而受损或产生不可接受的降级；②设备或系统在预定的电磁环境中正常地工作，且不会给环境（或其他设备）带来不可接受的电磁干扰。

设备或系统的电磁兼容性包括电磁骚扰水平和电磁抗扰度两个方面的指标。电磁骚扰水平是指设备或系统在正常运行过程中对所在环境产生的电磁骚扰不能超过规定的限值；电磁抗扰度是指设备或系统面临电磁骚扰不降低运行性能的能力。有时也用电磁敏感度描述设备或系统面临电磁骚扰不能避免性能降低的能力。抗扰度与敏感度是从两个不同角度反映设备或系统的抗干扰能力，抗扰度高则敏感度低，抗扰度低则敏感度高。通常民用标准体系用抗扰度，军用标准体系则用敏感度。

电磁骚扰与电磁干扰是两个完全不同的概念。电磁骚扰是指存在的电磁现象，它可能但不一定形成后果。电磁干扰则是由电磁骚扰引起的后果。

电磁兼容三要素 研究和解决电磁兼容问题时的三个基本环节，即电磁骚扰源、电磁耦合途径和电磁敏感对象。

电磁骚扰源 产生电磁骚扰的源。可按其来源、作用时间和频谱宽度进行分类。

按来源可分为自然电磁骚扰源和人为电磁骚扰源。自然电磁骚扰源包括宇宙射线、太阳黑子辐射、雷电、静电放电等。人为电磁骚扰源可分为两种：①功能性的或有意的：如广播台、电视台及各种通信设备发出的电磁波等，对电磁敏感对象也称为无用信号。此外，电磁骚扰源已成为一种很重要的作战手段，利用功率强大的电磁骚扰源，通过定向耦合系统向对方的人员与电子系统发射电磁骚扰，以损伤或干扰对方的人员与设备。此时，电磁骚扰源就是有意而为的，制造者努力去强化电磁骚扰的效果。②非功能性的或无意的：

包括电弧、电晕、火花放电等各种放电现象；电路中由触头合、分或开关型半导体器件导通、关断所产生的电磁现象；电路中各种电磁瞬态现象；电源电压骤降、谐波、断电等。此外，传播媒介自身变化如电离层状态变化对短波广播的干扰、信号导线端的反射和折射等，也被认为是一种无意的电磁骚扰源。

按作用时间可分为连续波骚扰源和瞬态波骚扰源。①连续波骚扰源：架空交流输电线路产生的工频电场和工频磁场等。②瞬态波骚扰源：雷电，开关合、分引起的瞬态电磁过程等。

按频谱宽度可分为窄带骚扰源和宽带骚扰源。①窄带骚扰源：工频或通信用的高频电磁波等。②宽带骚扰源：电磁脉冲等。

电磁耦合途径　电磁能量从电磁骚扰源传播到电磁敏感对象的途径。通常有传导耦合和场耦合两种方式。①传导耦合是通过导电通路传播电磁骚扰信号，包括导线直接耦合和公共阻抗耦合。②场耦合是通过空间电场、磁场、电磁波传播电磁骚扰信号，包括电场耦合（又称容性耦合）、磁场耦合（又称感性耦合）和电磁波耦合（又称辐射耦合）。

电磁敏感对象　可能受到电磁干扰的对象。不同设备或系统对电磁骚扰的敏感度有很大差别，取决于工作原理、线路布置、工作信号电平以及采取的抗干扰措施等。

研究的主要内容　有电磁骚扰源特性、电磁骚扰耦合机理、电磁干扰防护技术、电磁兼容测量技术、电磁兼容标准等。

电磁骚扰源特性　研究电磁骚扰产生的机理、时域和频域特性、主要表征参数、抑制其发射水平的方法等。

电磁骚扰耦合机理　研究电磁骚扰如何从电磁骚扰源耦合到电磁敏感对象，包括传导耦合和场耦合两个方面。

电磁干扰防护技术　研究滤波、限幅、接地、搭接、隔离、屏蔽（见电磁屏蔽）等各种硬件抗干扰技术在不同电磁骚扰下的效能，以及各种软件抗干扰方法。

电磁兼容测量技术　研究测量设备、试验场所、测量方法、数据处理方法以及测量结果的评价等。

电磁兼容标准　研究电磁兼容标准化组织发布的各类标准，包括设备或系统的电磁骚扰的发射限值标准、设备抗扰度标准、电磁环境通用发射限值标准、电磁环境通用抗扰度标准、电磁场曝露限值标准、电磁兼容测量设备标准等。

dianci ouhe

电磁耦合

（electromagnetic coupling）　电路、设备、系统内部以及与其他电路、设备、系统之间相互作用并传输电磁能量的现象。如在时变电磁场中，变化的电场会产生磁场，而变化的磁场又会产生电场，电场与磁场相互激发、相互作用，从而实现电磁能量的传输。在电磁兼容领域，电磁耦合是指电磁骚扰信号由骚扰源传播到敏感对象的现象。

按照耦合机理的不同，通常可以将电磁耦合分为传导耦合和场耦合两大类。

传导耦合　电磁骚扰信号通过导电回路传播到敏感对象的耦合方式。包括导线直接耦合和公共阻抗耦合。

导线直接耦合是最常见的传导耦合方式。例如，骚扰源和敏感对象之间的各类电源、信号、接地连接导线等。这些连接导线在为供电电源或信号源提供传输回路以及电位参考点的同时，也将骚扰源的电磁骚扰传输给敏感对象。

公共阻抗耦合是指骚扰源在供电电源回路或接地回路的公共阻抗上产生的阻抗电压作用于与之相连的其他敏感回路的耦合方式。图1表示公共阻抗耦合的方式，图中AB部分是骚扰源电路与敏感对象电路的公共回路，骚扰源电路中的电流 $i(t)$ 在公共回路的公共阻抗上产生骚扰电压 $u_{AB}(t)$ 并作用于敏感对象。

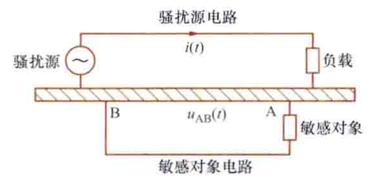


图1　公共阻抗耦合

通常可以采用电路理论来分析传导耦合问题。解决传导耦合问题的有效措施：①通过加入滤波器、隔离变压器、光电隔离等电路来隔离或阻断骚扰源与敏感对象之间的电磁骚扰信号通路；②减小供电电源回路和接地回路的公共阻抗的绝对值。

场耦合　电磁骚扰通过电场、磁场或者电磁波传播到敏感对象的耦合方式。场耦合可分为近场耦合和远场耦合。近场耦合也称感应场耦合，可分为电场耦合（又称容性耦合）和磁场耦合（又称感性耦合）；远场耦合也称电磁波耦合（又称辐射耦合）。

电场耦合　骚扰源通过两个电路之间的电场并以互电容（耦合电容）方式作用于敏感对象。可以采用静电场理论直接分析，也可以先采用静电场理论计算互电容，再采用电路理论分析。解决电场耦合的有效措施是尽量消除或减小骚扰源与敏感对象之间的互电容，例如，可采用静电屏蔽（见静电感应、电磁屏蔽）、增加骚扰源与敏感对象之间距离等方法。

磁场耦合　骚扰源通过两个电路之间的磁场并以互电感（耦合电感）方式作用于敏感对象。可以采用恒定磁场理论直接分析，也可以先采用恒定磁场理论计算互电感、再采用电路理论分析。解决磁场耦合的有效措施是尽量消除或减小骚扰源与敏感对象之间的互电感，例如，可采用磁屏蔽（见电磁屏蔽）、调整骚扰源和敏感对象之间方位、增加骚扰源与敏感对象之间距离等方法。

电磁波耦合　骚扰源以电磁波形式发射电磁骚扰通过空间传输至敏感对象的耦合方式。在电磁波耦合中，骚扰源一般可以等效为发射天线，敏感对象可以等效为接收天线，可以采用天线理论进行分析（见电磁辐射）。解决电磁波耦合的有效措施是对骚扰源或敏感对象实施电磁屏蔽。如果骚扰源或敏感对象对发射或接受方向敏感，也可以通过改变方向减小它们之间的耦合。

图2表示了安装在变电站保护小室内的保护与控制等二次设备可能受到的电磁骚扰的耦合方式。主要有雷击变电站导致的接地网地电位升通过二次电缆的传导耦合、开关操作在母线上产生的瞬态电压和电流，通过电压和电流互感器并经二次电缆的传导耦合、开关操作产生的瞬态电场和磁场及电磁波与二次电缆的电场耦合和磁场耦合，以及开关操作产生的瞬态电磁波透过保护小室对保护控制设备的辐射耦合。

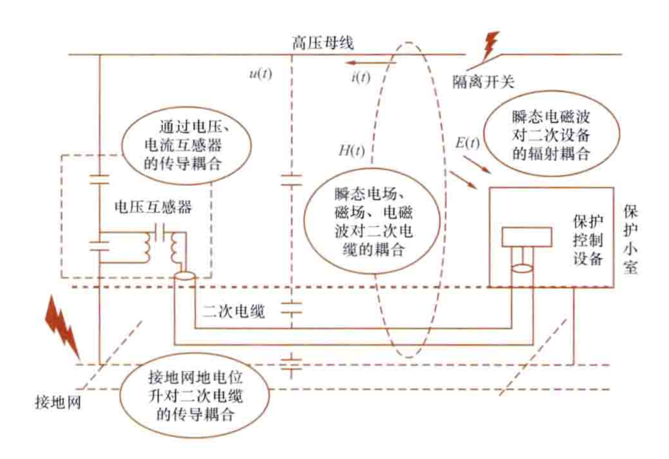


图 2　变电站二次设备的电磁耦合方式

$u(t)$ —母线瞬态电压；$i(t)$ —母线瞬态电流；

$E(t)$ —空间瞬态电场；$H(t)$ —空间瞬态磁场

dianci pingbi

电磁屏蔽

(electromagnetic shielding)　排除或抑制外界电磁场与电气设备之间相互干扰的措施。它包括静电屏蔽、磁屏蔽和时变电磁场屏蔽。通常说的电磁屏蔽多指时变电磁场屏蔽。

静电屏蔽　排除或抑制外界静电场与电气设备之间相互干扰的措施。例如用接地的封闭金属壳将设备罩起来。如图1所示，当接地的金属导体壳2完全包围了带电导体1但又互相绝缘时，导体1发出的电场线不能穿过导体2，使导体壳里面的导体1与其外面的导体3之间无静电感应现象。此时称导体2起了屏蔽作用。这样，凡希望不影响外界的带电体或希望不受外界静电场影响的物体，均可用一个接地的金属壳罩起来，该壳称为屏蔽装置。如果金属壳上有孔或缝，也会有一定的屏蔽作用。常利用接地的仪器金属外壳作为电子仪器的屏蔽装置，使其免受静电干扰。测量仪器中的屏蔽线，则是在导线绝缘外包有一层金属丝网作为屏蔽装置。使用屏蔽装置时，屏蔽装置需接地或接指定的固定等电位点。仪器内电源变压器的一次绕组与二次绕组之间，常安放不闭合的金属薄片或者绕一层漆包线并接地作为屏蔽装置。

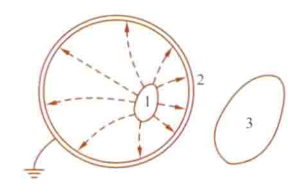


图 1　静电屏蔽

磁屏蔽　排除或抑制外界恒定磁场（包括直流电流的磁场）与电气设备之间相互干扰的措施。例如常使用具有高磁导率的铁磁材料制成的空腔壳将设备罩起来。该壳称为磁屏，它可以是全封闭的或近于封闭的。外界干扰磁场的磁场线在磁屏的外表面处发生折射，磁场线大部分通过磁屏，而腔内的磁场线大为减少，磁场强度显著下降，达到了抑制外界磁场干扰的目的（见图2）。屏蔽效果可用屏蔽因子 k 来表示。它定义为腔内磁场强度 H_i 与外部所加均匀磁场强度 H_o 的比值，即 $k=H_i/H_o$。k 值愈小，表示屏蔽效果愈好。长圆铁管中段处的屏蔽因子 k 为

$$k \approx \frac{4}{\mu_r(1-r_1^2/r_2^2)} \quad (\text{当 } \mu_r \gg 1 \text{ 时})$$

式中 r_1 和 r_2 分别为圆管的内半径和外半径（见图2），μ_r 为铁管的相对磁导率。该式成立的条件是 $\mu_r \gg 1$。显然，μ_r 越大以及磁屏的厚度越大，则 k 值越小，即屏蔽效果越好。为了获得更好的屏蔽效果，电气工程中常采用多层磁屏。

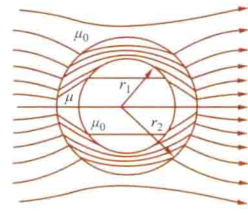


图 2　长圆铁管的磁屏蔽

时变电磁场屏蔽　排除或抑制外界时变电磁场与电气设备之间相互干扰的措施。工程实践中，常使用金属制成的空腔壳将设备罩起来。由于金属为良导体，能使电磁波在其外表面产生反射和在其中急骤衰减，故导体壳有阻止外界时变电磁场透入金属壳内的作用。例如在收音机中，用铝壳罩在中频变压器线圈的外面，使它不受外界高频电磁场的干扰以避免杂音。又如在阴极射线示波器中，通常用铁皮包着示波管，使射线的扫描不受示波器中杂散电磁场的影响；同时示波器外壳使用铁皮制成，使杂散电磁场难以透出外壳去影响外部其他设备。对于正弦电磁场，屏蔽层的厚度一般须接近或大于屏蔽导体中电磁波的波长 λ，波长 λ 与趋肤深度 d 的关系为

$$\lambda = 2\pi d,\ d=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}\ (\omega = 2\pi f)$$

式中 ω 和 f 分别为正弦电磁场的角频率和频率；μ 和 γ 分别为金属壳的磁导率和电导率。随着频率的增高，波长与趋肤深度将变小（见趋肤效应），从而屏蔽层的厚度可以相应地减少。

dianci saorao

电磁骚扰

(electromagnetic disturbance)　任何可能引起装置、设备或系统性能降低或对有生命或无生命物质产生损毁作用的电磁现象。

电磁骚扰分类　电磁骚扰可以按照不同的方法分类。按照骚扰的频谱宽度分为窄带骚扰和宽带骚扰；按照骚扰的作用时间分为瞬态骚扰和稳态骚扰。按照电磁骚扰产生的原因分为自然电磁骚扰和人为电磁骚扰。

自然电磁骚扰　主要来源于自然界大气层和地球外层空间的电磁噪声，包括宇宙、大气、热等电磁噪声、沉积静电噪声和磁暴等。这些电磁骚扰是构成地球电磁环境的基本组成部分。

宇宙电磁噪声是来自太阳系、银河系的电磁扰动，包括太阳、月亮、恒星、行星和星系等发出的太空背景电磁噪声、无线电噪声等，频率范围一般在2～50MHz。

大气电磁噪声主要是由雷电产生的，其频谱在30MHz之内。此外，大气中的沙暴、雨雾等自然现象也可以产生电磁噪声。

热电磁噪声是指处于一定热力状态下的导体所出现的无规则电起伏，由导体中自由电子的无规则运动引起。

沉积静电噪声指飞行器高速接触大气中的尘埃、雨点、雪花、冰雹时产生的电荷积累的静电，可以引起火花放电和电晕放电等电磁现象。

地球磁场主要是由于地核物质运动产生的，磁暴是一种全球性的强烈地磁场扰动现象。磁暴可以引起电离层扰动，从而干扰短波无线电通信。

人为电磁骚扰　主要是伴随电气与电子设备工作时产生的电磁骚扰，包括工业、科学、医疗设备，电力系统，电牵引系统，内燃机点火系统，信息技术设备，无线电发射设备，静电放电，照明系统，家用电器和电动工具等产生的电磁骚扰。这些电磁骚扰源存在于现代人类生活的各个环节和过程中，不可能完全排除。这些电磁骚扰可能会影响周围的电气与电子设备，但通过采取合适的设计、布置和措施，可以降低其影响的程度。

电磁骚扰信号的分类　电磁骚扰信号可以分为确定性信号与随机性信号。而对于确定性信号，又可以分为周期信号与非周期信号。

确定性信号与随机性信号　对于自变量是指定值时其函数值确定的信号定义为确定性信号；反之，函数值不确定且具有随机性的信号称为随机性信号，也称为不确定性信号。实际中的电磁骚扰信号多是随机性的，在信号的产生、传输和接收过程中受到大量不确定性因素的影响。从严格意义上讲，电磁骚扰信号都是随机性信号。但是，在一定的条件下，如果这些不确定性因素的影响较小，可以将它们视为确定性信号。

周期信号与非周期信号　对于确定性信号，如果信号随自变量周而复始地变化，且无始无终，则称这个信号为周期信号。不具有周期性变化的信号称为非周期信号。

通过对电磁骚扰信号进行时域和频域的分析能够获得其特征。周期性电磁骚扰信号的时域特征参数有周期、峰值和极性，频域特征参数有频谱和带宽。非周期电磁骚扰信号的时域特征参数有上升（下降）时间、持续时间、峰峰值和极性，频域特征参数有频谱密度、带宽和主频分布等。获得电磁骚扰信号的时域和频域特征对于有针对性的采取抑制措施十分必要，比如对于高幅值的瞬态信号采用浪涌抑制器，而对于高频稳态骚扰信号采用低通滤波器等。

diandao

电导　(conductance)　见电阻。

diandaolü

电导率　(conductivity)　见电阻率。

diandongshi

电动势　(electromotive force)　沿一路径移动单位正电荷，非库仑电场对单位正电荷所做的功。电动势的单位是伏［特］(V)。直流电源内部，存在着局外电场强度 $\boldsymbol{E}'$，它能将其他形式能量转换为电能。电动势 $e=\int_l \boldsymbol{E}'\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$，$\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 是路径上的长度元。e 也是表征电源提供电能强弱的一个物理量。

日常所用的电源，如电池，就是将化学能转换成电能的电源，使电池的两电极之间出现恒定的电动势。发电机则是把机械能转换成电能的电源，它的电动势是发电机的转子旋转后，通过电磁感应而产生的。两种不同金属互相接触，它们之间会产生接触电动势。从现代的观点来看，接触电动势的起因是两种金属的逸出功不同。两种不同的金属组成闭合回路，它们的两个连接端点如处于不同的温度 T_1、T_2 状态，则会产生温差电动势 $e_T=\alpha_T(T_1-T_2)$，α_T 称为温差电动势率。不过这种电动势的数值很小。温差电动势效应既可以用来作为小型电源，也可用来测量温度，按这一原理制成的温度计叫热电偶式温度计。半导体材料吸收可见光产生光电动势，利用光电效应可检测辐射率或制成太阳能发电装置。晶体受到机械应力也会产生电动势，这种压电效应被应用于晶体话筒和某些传感器中。

diangan

电感　(inductance)　描述由于线圈电流变化，在本线圈中或在另一线圈中引起感应电动势效应的电路参数。电感是自感和互感的总称。在国际单位制（SI）中，电感的单位是亨［利］(H)。提供电感的器件称为电感器。

自感　一个通有电流 I 的线圈（或回路），其各线匝交链的磁通量的总和称为该线圈的磁链 Ψ。如果各线匝交链的磁通量都是 Φ，线圈的匝数为 N，则线圈的磁链 $\Psi=N\Phi$。线圈电流 I 随时间变化时，磁链 Ψ 也随时间变化。根据电磁感应定律（见电磁感应），在线圈中将感生自感电动势 e_L，其值为

$$e_L=-\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}$$

定义线圈的自感 L 为自感电动势 e_L 与电流的时间导数 $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$ 之比的负值，即

$$L=-e_L\Big/\left(\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}\right)$$

以上两式中，Ψ 和 e_L 的正方向，以及 Ψ 和 I 的正方向都符合右手螺旋关系。已知电感 L，就可以由 $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$ 计算自感电动势。此外，自感还可定义如下

$$L=-\left(-\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}\right)\Big/\left(\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}\right)=\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}I}$$

线性磁介质下的自感　若线圈放在线性磁介质中并通以恒定电流 I，则恒定磁链 Ψ 和 I 成正比。此时，自感 $L=\Psi/I$ 是正常量。若电流是时变的，但其变化率较低时，例如电流 I 是频率较低的正弦电流时，仍可认为线圈的 Ψ-I 关系维持恒定电流时的关系不变。这时，电感 $L=\Psi/I$ 是正常量。

非线性磁介质下的自感　若线圈附近有非线性磁介质（一般为铁磁物质），当线圈中通以恒定电流 I 时，Ψ 和 I 不成正比，它们的关系用 Ψ-I 曲线表示（见无源二端元件）。$\mathrm{d}\Psi/\mathrm{d}I$ 即曲线斜率，它是正数，而且是电流 I 或 Ψ 的函数。这时，电感称动态电感，记作 L_d，以区别于静态电感。静态电感记作 $L_s=\Psi/I$，它不能用来计算感应电动势。

线性磁介质下四种自感计算公式　从工程观点看，除铁磁材料以外的磁介质可认为是线性磁介质，它们的磁导率近似等于真空磁导率 μ_0。置于这种磁介质中的线圈的自感，只与线圈及其线匝导体的形状、尺寸有关，与电流的大小无关。四种几何形状简单的线圈或回路的自感 L 的计算公式如下：

（1）长螺线管的自感（忽略端部效应和线匝径向尺寸）

$$L=\mu_0 N^2 S/l$$

式中 l 为螺线管的长度；S 为螺线管的截面积；N 为总匝数。

（2）空芯螺绕环线圈的自感（环的截面为正方形，环的

平均半径为 R)

$$L = \frac{\mu_0 N^2 b}{2\pi} \ln \frac{2R+b}{2R-b}$$

式中 b 为正方形截面的边长；N 为总匝数。若 $R \gg b$，近似有 $L \approx \mu_0 N^2 b^2/(2\pi R)$，形式上与长螺线管自感计算式相同。

(3) 同轴电缆的自感(忽略端部效应)

$$L = L_i + L_o = \frac{\mu_0 l}{8\pi} + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

式中 R_1、R_2 分别为同轴电缆内外导体的半径；l 为电缆长度；L_i 和 L_o 分别称为同轴电缆的内自感和外自感，其中内自感 L_i 的值仅与电缆内导体的长度有关，而与其半径无关。

(4) 二线传输线的自感(忽略端部效应)

$$L = L_i + L_o = \frac{\mu_0 l}{4\pi} + \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{D-R}{R}$$

式中 R 为两导线的半径；l 为传输线长度；D 为两导线轴线间距离。

互感 设线性磁介质中有两个相邻的线圈，线圈1中有电流 I_1，I_1 产生的与线圈2交链的那部分磁通量形成互感磁链 Ψ_{21}。电流 I_1 随时间变化时，Ψ_{21} 也随之变化。由电磁感应定律，线圈2中将出现互感电动势 e_{M2}

$$e_{M2} = -\frac{d\Psi_{21}}{dt}$$

定义线圈1对线圈2的互感 M_{21} 为

$$M_{21} = -e_{M2} \Big/ \left(\frac{dI_1}{dt}\right)$$

类似的，若线圈2中有电流 I_2，它产生互感磁链 Ψ_{12} 与线圈1交链。I_2 变化时，线圈1中出现互感电动势 e_{M1}

$$e_{M1} = -M_{12}\frac{dI_2}{dt}$$

式中 M_{12} 称线圈2对线圈1的互感。上式是 M_{12} 的定义式。

若电流 I_1 是恒定电流，或 I_1 是变化率较低的时变电流，互感磁链 Ψ_{21} 与 I_1 成正比，此比例系数(正常量)即线圈1对线圈2的互感 M_{21}，且

$$\Psi_{21} = M_{21} I_1$$

类似的，若电流 I_2 是恒定电流或变化率较低的时变电流，Ψ_{12} 和 I_2 成正比，比例系数即线圈2对线圈1的互感 M_{12}，满足

$$\Psi_{12} = M_{12} I_2$$

理论证明，$M_{12} = M_{21}$，用 M 代表它们，则

$$M = \frac{\Psi_{21}}{I_1} = \frac{\Psi_{12}}{I_2}$$

在线圈1、2中同时通以时变电流，它们分别是 I_1、I_2 时，线圈中的感应电动势 e_1，e_2 是自感电动势和互感电动势之和

$$e_1 = -L_1\frac{dI_1}{dt} - M\frac{dI_2}{dt}$$

$$e_2 = -L_2\frac{dI_2}{dt} - M\frac{dI_1}{dt}$$

线性磁介质下两种互感计算公式　互感 M 不仅与线圈及其导体的形状、尺寸有关，还与两线圈的相互位置有关。

(1) 两同轴长螺线管间的互感(近似认为螺线管内磁场均匀分布，螺线管外没有磁场，两螺线管半径为同一数值 R，设两螺线管长度分别为 l_1 和 l_2，且 $l_1 > l_2$)

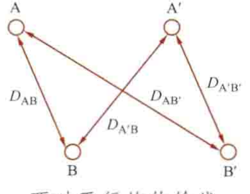
$$M = \frac{\mu_0 \pi R^2 N_1 N_2}{l_1}$$

式中 N_1、N_2 分别为两螺线管的匝数。

(2) 两对传输线间的互感(设两对二线传输线 AA′ 和 BB′ 相互平行，忽略端部效应及导线半径的影响)

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_{AB'} D_{A'B}}{D_{AB} D_{A'B'}}$$

式中 $D_{AB'}$、$D_{A'B}$、D_{AB}、$D_{A'B'}$ 分别为两对传输线间相应导线间的距离，如图示；l 为传输线长度。



两对平行的传输线

三相制均衡输电线的电感　三根输电线之间有互感。在采用三相输电线换位技术后，各相均衡。在考虑了自感磁链和互感磁链后，每一相输电线单位长的等效电感 L 为

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\ln\frac{D}{R} + \frac{1}{4}\right)$$

式中 $D = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}}$ (D_{AB}、D_{BC}、D_{CA} 分别为相应相线间的距离)称为几何平均距离，R 为导线半径。

线性磁介质下磁场能量计算公式　可分单个、两个、多个载流线圈三种情况。

单个载流线圈　线圈中通以电流 I 时，在空间建立磁场，磁场能量 W_m 按下式计算

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2$$

式中 L 是线圈的自感。切断电源时，磁场能量必须释放，此时伴生感应电动势。切断电源过程中，开关触头处常见到的电弧就是这感应电动势产生的效应，维持电弧燃烧的能量来源于正在衰减的磁场能量。

两个载流线圈　磁场能量 W_m 为

$$W_m = \frac{1}{2}L_1 I_1^2 + \frac{1}{2}L_2 I_2^2 \pm M I_1 I_2$$

式中 L_1、L_2 分别是线圈1、2的自感；M 是两线圈间的互感；I_1、I_2 分别是线圈1、2中的电流。互感 M 的正负取决于两线圈中电流 I_1 和 I_2 产生的磁场是相互加强的，还是相互减弱的。如果相互加强，则 M 为正；如果相互减弱，则 M 为负。

多个载流线圈　磁场能量 W_m 为

$$W_m = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n} L_k I_k^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{\substack{h=1 \\ k \neq h}}^{n} (\pm M_{kh}) I_k I_h$$

式中 L_k、I_k 分别是第 k 个线圈的自感和线圈电流；M_{kh} 是第 k 个线圈和第 h 个线圈之间的互感。如果电流 I_k 和 I_h 产生的磁场相互加强，则 M_{kh} 为正，反之为负。

diangan celiang

电感测量

(inductance measurement)　基本电参数电感(自感和互感)的测量。电感的单位为亨(H)。在电工与电子技术领域，常用导线绕成各种形状的线圈，制成具有一定电感值的电感器，以获得较集中的磁场。为增强磁场、缩小线圈尺寸，有时还在线圈内加装铁芯。鉴于线圈导线的电阻和铁芯有功率损耗，常以一电感和一电阻的串联作为线圈的等值电路。电感的测量分为自感测量和互感测量。

自感测量 常用的测量方法有冲击法、三表法、谐振法和电桥法等。

冲击法 用冲击检流计间接测量自感的方法。其原理接线如图1（a）所示，所用测量仪表为直流电流表和冲击检流计。被测线圈 L 通直流电流 I，将开关S由位置1迅速投切至位置2，线圈中的磁场储能通过检流计泄放，泄放的电荷 Q 由检流计读出。自感 L 可由电荷 Q、电流 I 及放电回路的总电阻 R（包括线圈电阻 r、检流计内阻等）按公式 $L=QR/I$ 计算出。

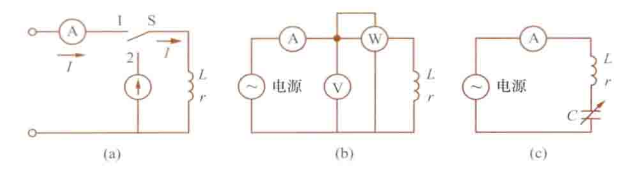


图1 自感测量

（a）冲击法；（b）三表法；（c）谐振法

三表法 用交流电压表、电流表、功率表测量自感的方法。该方法的原理接线如图1（b）所示。自感 L 可由三表分别测得的 U、I、P 值以及已知的电源频率值 f 按公式 $L=\sqrt{(U/I)^2-(P/I^2)^2}/(2\pi f)$ 计算得到。若 $P\approx 0$，电阻 r 可忽略，自感 L 可只由 U、I 值按公式 $L=U/(2\pi fI)$ 计算。

谐振法 利用电感、电容构成的电路发生谐振实现自感测量的方法。该方法的原理接线如图1（c）所示，C 为标准可变电容器。调节 C 使电流表的示值最大，此时电路处于串联谐振状态。自感 L 可由 C 值和电源频率值 f 按公式 $L=1/[(2\pi f)^2C]$ 计算得到。

电桥法 用交流电桥测量自感的方法。

互感测量 常用的方法有冲击法、伏安表法、坎贝尔桥法和正反串接法等。

冲击法 用冲击检流计间接测量互感的方法。原理接线如图2（a）所示。对线圈通入直流电流 I，将开关S由位置1迅速投切至位置2，线圈磁场储能通过检流计泄放。互感 M 可由泄放电荷 Q、电流 I 及检流计回路总电阻 R，按公式 $M=QR/I$ 计算得到。

伏安表法 用交流电压表、电流表测量互感的方法。原理接线如图2（b）所示。互感 M 可由两表分别测得的 U、I 值及电源频率值 f 按公式 $M=U/(2\pi fI)$ 计算得到。

坎贝尔桥法 将互感线圈与可变标准电容器按图2（c）测量互感的方法接线。调节 C 使检测仪表指零。互感 M 可由 C 值及已知的电源频率值 f 按公式 $M=1/[(2\pi f)^2C]$ 计算得到。

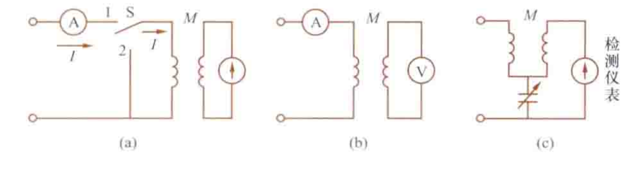


图2 互感测量

（a）冲击法；（b）伏安表法；（c）坎贝尔桥法

正反串联法 被测两线圈正向和反向串联间接测出互感的方法。设两线圈的自感分别为 L_1、L_2，互感为 M，则两线圈正向和反向串联时的等值电感分别为 $L_p=L_1+L_2+2M$，$L_n=L_1+L_2-2M$。互感可由测得的 L_p、L_n 值按公式 $M=(L_p-L_n)/4$ 计算得到。

dianganqi

电感器 （inductor）

能够把电能转化为磁能并存储的二端电路元件，简称电感，用字母“L”表示，基本单位是亨利（H）。是由导线在绝缘管上单层或多层绕制而成，导线彼此互相绝缘，而绝缘管可以是空心的，也可以包含铁芯或磁粉芯，因此也称为电感线圈，其主要作用是阻止电流的变化。在电子电路中起滤波、限流、调谐、振荡、抑制干扰、产生磁场的作用。大多数电感线圈必须根据其电感量、使用要求及结构要求等专门设计制作，但是应用于印制电路板以及各种滤波及选频装置中的电感器往往只需要满足其电气参数要求而没有其他特殊结构要求，可以在固定电感器的系列产品中选用。电感线圈的电路符号如图所示。

分类 电感器种类繁多：①按用途分为：天线线圈、振荡线圈、扼流线圈、陷波线圈、偏转线圈等；②按工作频率分为：高频、中频、低频线圈；③按导磁体性质分为：空心线圈、铁氧体线圈、铁芯线圈、铜芯线圈等；④按电感量是否可调分为：固定电感、可变电感、微调电感；⑤按形状分为：线绕电感（单层线圈、多层线圈及蜂房线圈）、平面电感（印制板电感、片状电感）。

空心电感 铁芯电感 磁芯电感 可变电感

电感线圈的电路符号

主要参数 表征电感特性的主要参数有标称电感量及其允许偏差、品质因数、额定电流、分布电容与直流电阻等。①标称电感量（L）：电感器上标注的电感量的大小，主要取决于线圈的匝数、结构及绕制方法等，与电流大小无关。反映电感存储磁场能的能力，也反映电感器通过变化电流时产生感应电动势的能力。电感器的实际电感量相对于标称值的最大允许偏差范围称为允许偏差，一般在±5%～±20%。②电感的品质因数：定义为 $Q=\omega L/R$，ω 是工作角频率，R 是表示电感线圈的电阻。品质因数值越高表明电感线圈的功率损耗越小，效率越高。Q 值通常为几十到几百。③额定电流：电感长期连续工作时，允许通过的最大电流值。④分布电容：存在于电感线圈匝与匝之间、两个电极之间。分布电容的存在使线圈的 Q 值减小，故分布电容越小越好。在绕制时，常采用间绕法、蜂房绕法，以减小分布电容。⑤电感线圈：由导线绕成，导线存在一定的直流电阻。直流电阻的存在，会使线圈损耗增大，品质因数降低。在绕制时，常用加粗导线来减小直流电阻。

diangong cailiao

电工材料 （electrical engineering materials）

用于电工领域中的各类材料的总称。根据它们的电磁特性可分为绝缘材料、半导体材料、导电材料和磁性材料四大类。此外，还包括其他一些结构材料和功能转换材料。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“电工材料”部分。

参考书目

巫松桢，谢大荣，陈寿田，俞秉莉．电气绝缘材料科学与

工程．西安：西安交通大学出版社，1995.
钟力生，李盛涛，徐传骧，刘辅宜．工程电介质物理与介电现象．西安：西安交通大学出版社，2013.

diangong yiqi yibiao jianding guicheng

电工仪器仪表检定规程 (verification regulation of electrical instruments) 为进行计量检定，评定电工计量器具、测量仪器仪表性能，判断其是否合格而制定的法定性文件。属于计量技术法规，是计量检定人员对计量器具和测量仪器仪表进行检定，计量监督人员对计量器具和测量仪器仪表的计量、检定工作进行监督管理的重要法定依据。计量检定规程的主要内容包括技术要求，检定的条件、项目、方法、数据处理和周期等规定。

根据《中华人民共和国计量法》，计量检定规程分为国家计量检定规程、部门计量检定规程和地方计量检定规程。国家计量检定规程由中国国务院计量行政部门制定，在全国范围内施行，代号是JJG，例如JJG124—××××《电流表、电压表及功率表检定规程》。其中"××××"代表公元纪年的四位数字，用于表示规程批准年份；数字"124"代表该规程的序号。没有国家计量检定规程的，国务院各部门和各省、自治区、直辖市可制定本部门或本地方的计量检定规程，代号也是JJG，但要在括号中注明部门或地方名的简称，例如JJG（电力）1—1999、JJG（京）4—1999。以计量检定规程作处理计量纠纷的依据时，国家计量检定规程的效力高于部门或地方计量检定规程的效力。（见《综合卷》标准）

dianguang cailiao

电光材料 (electrooptical material) 具有电光效应的光学功能材料。在外加电场作用下电介质折射率发生变化的现象称为电光效应。按效应与调制电场的幂次关系，分为线性电光材料、平方电光材料和高次电光材料。

利用电光效应可实现对光波的调制。某些晶体物质，例如磷酸二氢钾（KH_2PO_4）、铌酸锂（$LiNbO_3$）、硅酸铋（$Bi_{12}SiO_{20}$）等，外加电场所引起的折射率变化与外加电场强度的一次方成正比，该效应称为一次电光效应或泡克尔（Pockels）效应。泡克尔效应在光开关、激光通信、激光雷达等方面具有广泛的应用。许多液体电介质在外加电场的作用下出现光各向异性，从而产生双折射效应，其折射率之差正比于电场强度的平方，该效应称为二次电光效应或克尔（Kerr）效应。克尔效应在高速摄影、光束测距、激光通信、激光电视等方面具有广泛的应用。

电光材料主要应用于光调制器、偏转器、波导激活元件、光致折变立体全息元件等领域。这些材料的发展主要有三个方面：①优化传统无机晶体生长工艺以获得更好的电光特性；②研究利用非线性有机聚合物和半导体超晶格两类新型电光材料；③拓展电光效应在电子光学领域的应用。

dianhe

电荷 (electric charge) 构成物质的基本粒子的一种电性质。古代希腊人发现有些物体如琥珀和羊毛相互摩擦后能吸引轻小物体。中国古代也有"顿牟掇芥"之说。这是由于这两种物体摩擦后带有电荷。电荷有两种，同性电荷相斥，异性电荷相吸。后来，B. 富兰克林（B. Franklin，1706—1790）首先以正、负电荷的名称来区分这两种电荷。带电体的电荷量，在SI单位制中的单位是库［仑］（C）。

电荷转移 近代实验证明，自然界中物质的原子由带负电荷的电子和带正电荷的原子核所组成，通常物体内正、负电荷的数量相等，宏观上不呈现带电性。当受到外界某种作用时，例如机械摩擦或化学分解，物体内的电荷转移而失去平衡，使物体带有正或负的电荷。现代物理实验又发现电荷总是以一个基本单元的整数倍出现。电荷的基本单元是一个电子或一个质子所带电量的绝对值，这个绝对值的大小为 $e=1.602\times10^{-19}$ C。电荷既不能凭空被创造，也不能凭空被消灭，电荷转移前后的总电量维持不变。这一规律叫做电荷守恒定律。它是自然界的一个基本定律。

电荷密度 在研究宏观电磁现象时，可不考虑电荷的微观结构。从统计平均效应出发，认为电荷是连续分布在带电体中。定义电荷体密度 $\rho=\lim\limits_{\Delta V\to0}\dfrac{\Delta q}{\Delta V}$，电荷面密度 $\sigma=\lim\limits_{\Delta S\to0}\dfrac{\Delta q}{\Delta S}$，这里 ΔV 代表物理体积元，ΔS 代表物理面积元，其中所带的电荷 Δq 仍含有大量电荷基本单元。当带电体本身的线度比所研究的问题中涉及的距离小很多时，可简化处理为点电荷或线电荷分布，并以此来分析计算。

dianhuaxue jichuan

电化学击穿 (electrochemical breakdown) 在电场、温度等因素作用下，固体电介质因缓慢的化学变化，而引起其电气性能逐渐劣化，最终由绝缘状态突变为良导电状态的过程。

电化学击穿经历两个过程，首先是电介质老化，即固体电介质因发生化学变化而引起的电气绝缘性能劣化，随后即是与老化有关的击穿。

固体电介质发生缓慢化学变化的原因是多种多样的。直流电压下，固体电介质因离子电导而发生电解过程，结果在电极附近形成导电的金属树枝状物，甚至从一个电极伸展到另一个电极；在电场，特别是交变电场作用下，固体电介质内部的气泡中，或不同固体电介质之间的气体或油隙中，会发生局部放电；与固体电介质接触的电极边缘场强较强的局部区域内如有气体或液体电介质，也会发生局部放电，而局部放电的长期存在会使固体电介质逐渐损坏；空气中放电所形成的臭氧、氮的氧化物等化学性质活泼的物质，会使固体电介质发生化学变化；对于有机固体电介质，在电极上尖端处或微小气隙处，会发生树枝状放电，并留下炭化痕迹，发生电树老化；在电场力的作用下，受潮的有机固体电介质中的液态介质会沿着电场方向伸展，引发树枝状放电通道，发生水树老化。

电场越强，温度越高，电压作用时间越长，则固体电介质的化学变化进行得越强烈，其性能的劣化也越严重。

固体电介质的化学变化通常导致电导增大，致使其温度上升，因而电化学击穿的最终形式常是热击穿。

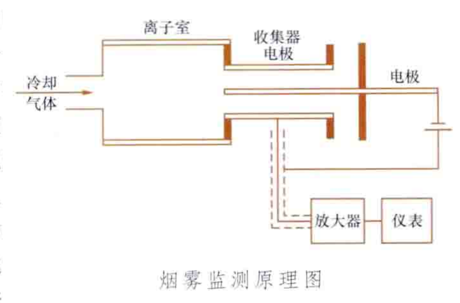
dianji jueyuan de zaixian zhenduan

电机绝缘的在线诊断 (on-line insulation diagnosis of electrical machine) 对运行状态下的电机绝缘进行

试验和各种特性测量，分析其特征，并对绝缘状态作出判断的技术。推行和发展电机绝缘在线诊断技术，能在早期发现故障，提高电机的运行可靠性。电机绝缘在线诊断的项目有：①局部放电；②局部过热；③氢冷系统；④转子绕组匝间短路。

局部放电　采用测量放电脉冲信号的方法来监测电机的局部放电（见局部放电试验），采用的传感器为罗戈夫斯基线圈型电流传感器或定子槽耦合器。在大型发电机出线母线筒低电位处加设金属电极，使其与母线形成耦合电容，将金属电极的接地线穿越罗戈夫斯基线圈型电流传感器的磁芯，可检测放电信号。也可利用发电机中性点电压互感器的杂散电容，将其一次绕组的入地线穿越电流传感器的磁芯。定子槽耦合器是类似于天线的一种放电信号传感器，安装在定子绕组高压端附近的槽楔下。可在每相绕组两条并联支路的高压端处分别安装槽耦合器，组成平衡测量回路，以抑制外界干扰信号的影响。传感器的输出信号经放大、滤波、数据采集后送计算机分析、储存。要采取各种措施来抑制现场强烈的电磁干扰。可根据视在放电量或根据 φ-q-n（φ：放电发生时的工频电压相位；q：放电量；n：放电重复率）三维谱图用人工神经网络进行判断。

局部过热　电机绝缘很多是有机聚合物，受高温作用会产生气态、液态、固态的化学物质，形成烟雾，可通过监测烟雾来发现局部过热。烟雾监测器的原理框图如图所示。电机的冷却气体进入离子室，由弱放射性源（α 射线源）电离；再流经加有电压的两个电极，气体中的自由电荷被电极收集，流经外接放大电路，放大器的输出信号正比于离子流。若冷却气体中有浓烟雾，烟雾粒子在电离室内也被电离。由于它们的活动性稍小，此时离子流随之减小。因此，可根据离子流的变化来检测烟雾的存在。当发现电机已有局部过热故障时，可采用前置柱吸附绝缘过热分解产生的气体，然后将前置柱迅速加热，使吸附的气体释放出来，再用气相色谱仪进行气体成分分析，并与样板对照作出判断。



烟雾监测原理图

氢冷系统　氢冷发电机氢气系统的泄漏后果严重。当冷却水系统有裂缝，氢会漏入水中，水也会进入氢气中。对氢冷系统的监测包括氢气湿度和氢气泄漏。氧化铝薄膜烧结电容器的阻抗与吸入水汽有关，应用据此原理制成的湿度传感器来监测氢气湿度。应用钯栅氢敏元件来监测氢气的泄漏。

转子绕组匝间短路　发电机转子励磁绕组匝间短路导致局部过热，危害绝缘；引起转子弯曲，加剧电机振动。根据电机运转时，安装在定子气隙的静止检测线圈的输出电压波形，可诊断出转子绕组的匝间短路。对于两极的同步发电机，当转子绕组匝间短路时，在定子绕组的各相并联支路形成的回路中会产生偶次谐波，也可据此诊断转子绕组的匝间短路。

dianjiezhi

电介质　(dielectrics)　在电场作用下能被极化的物质。M. 法拉第（Michael Faraday）最早给出电介质的定义是“电力线能穿过的物质”，也就是说，电介质内部存在电场强度。一般认为电阻率超过$10^8\Omega\cdot m$的物质为绝缘电介质。

在 20 世纪 30 年代以前，电介质只是作为电气绝缘材料应用，所以通常人们认为电介质就是绝缘体（在电场作用下具有电极化现象并存在较强电场的物质）。其实某些非绝缘体如半导体、生物体在一些特定条件下（如 P-N 结、高频状态）具有电介质特性，也属电介质，因而电介质并非都为绝缘体。

近代随着科学技术的发展，发现某些固体电介质具有许多与极化有关的特殊性能，称为电介质的功能特性，例如电致伸缩、压电性（见压电材料）、热释电性（见热释电材料）、铁电性（见铁电材料）等，引起了广泛的研究和应用，从而扩大了电介质的范畴。电介质不仅作为绝缘材料，而且作为功能材料被广泛应用。

电介质分布极广，可以是气体（空气、氢、六氟化硫等）、液体（矿物绝缘油、合成绝缘油、植物绝缘油、纯水等）或固体（玻璃、陶瓷、云母、橡胶、塑料等）。无论哪一种电介质，都是由分子（原子或离子）组成，而它们又都是由带正电的原子核和围绕核的电子云所组成。根据分子中电荷分布的特性，电介质可以分为三类：非极性电介质、极性电介质和离子型电介质。

（1）非极性电介质：没有电场时，其分子的正负电荷中心重合。属于此类电介质的分子具有对称的结构，如双原子单质分子气体（H_2、N_2、Cl_2等）、烷系碳氢化合物、矿物绝缘油、石蜡、地蜡、聚乙烯、聚四氟乙烯等均属于非极性电介质。通常，非极性电介质的电容率不大，在固态、液态下，$\varepsilon_r=2.0\sim2.5$，体积电阻率较高。

（2）极性电介质：没有电场时，其分子的正负电荷中心不重合，即分子具有固有偶极矩。一般属于此类电介质的分子具有不对称结构，如蓖麻油、松香、聚氯乙烯、纤维、酚醛树脂、纯水等均为极性电介质。极性电介质的电容率比非极性电介质的高，在常温下，典型固态和液态极性电介质的 $\varepsilon_r=2.6\sim80$，而且体积电阻率的变化范围较大。

（3）离子型电介质：与非极性电介质和极性电介质不同，离子型电介质是由正负离子组成。属于此类电介质的有石英、云母、无机玻璃、陶瓷等。这类电介质电容率的变化范围较大。大部分陶瓷介质的主晶相都是由较低电容率的离子晶体组成，相对电容率$\varepsilon_r=5\sim10$；少数高价离子氧化物晶体电介质的电容率很高，如金红石（TiO_2）的 $\varepsilon_r=173$（平行于 C 轴方向）。

dianjiezhi diandao

电介质电导　(electrical conduction of dielectrics)　电介质中能自由迁移的带电粒子（载流子）在电场作用下的定向迁移性能。通常以电导率或电阻率表征。电介质的电导率与载流子的浓度、所带电荷量及迁移率有关。载流子一般是电子和离子。

载流子在电场作用下沿电场方向获得一宏观平均速度

v，在线性电介质中，v 与电场强度 E 成正比，$v=\mu E$，μ 为载流子的迁移率。如果电介质中载流子浓度为 n，每一载流子的电荷量为 q，那么电介质的电导率为

$$\gamma = qn\mu \tag{1}$$

在有 m 种载流子参与导电时，电介质的电导率为

$$\gamma = \sum_{i=1}^{m} q_i n_i \mu_i \tag{2}$$

式中 q_i 为第 i 种载流子的电荷量，n_i 为第 i 种载流子的浓度，μ_i 为第 i 种载流子的迁移率。

按载流子的种类，电介质的电导可分为电子电导、离子电导、胶粒电导三类。①电子电导（包括空穴电导），载流子是带负电荷的电子（或带正电荷的空穴）。②离子电导，载流子是离解的原子或原子团（离子），可以带正电荷，也可以带负电荷，如 Na^+、Cl^-、$(OH)^-$ 等，离子导电时，伴随有电解现象发生。③胶粒电导，载流子是带电的胶粒，如油中处于乳化状态的水等。

决定电介质导电性的微观参数是载流子的浓度和迁移率，弱电场作用下的绝缘电介质电导主要是离子电导，强电场作用下的绝缘电介质电导主要是电子电导。

dianjiezhi jichuan

电介质击穿 (breakdown of dielectrics) 在外施电场作用下电介质由绝缘状态变为导电状态的现象。当施加在电介质上的电场强度增加到相当大时，其电流密度按指数规律随电场强度增加而增加，电场进一步增强到某一临界值时，电介质发生击穿，电流剧烈增加。通常以电介质伏安特性斜率趋于无穷大作为击穿发生的标志。发生击穿时的临界电压称为电介质的击穿电压，相应的电场强度称为电介质的击穿场强，又称为电气强度。

气体、液体和固体电介质的击穿分别参见气体击穿理论、液体电介质击穿和固体电介质击穿。

dianjiezhi jihua

电介质极化 (polarization of dielectrics) 在外电场作用下，电介质内部沿电场方向产生感应电偶极矩，电介质表面出现束缚电荷的现象。

根据极化的微观机理，电介质极化可以归结为四种基本形式：电子位移极化、原子（离子）位移极化、转向极化和空间电荷或界面极化。

电子位移极化　在外电场作用下，电介质组成粒子（原子、离子或分子）中围绕原子核的电子云相对带正电的原子核所作的弹性位移而产生感应电偶极矩。两者的质量差别极大，主要位移由电子完成。

原子（离子）位移极化　在外电场作用下，构成分子的原子（或异号离子）之间发生相对弹性位移而产生感应电偶极矩。

转向极化　在外电场作用下，电介质极性分子的固有电偶极矩沿电场方向转向而产生宏观的感应电偶极矩。

空间电荷极化或界面极化　电介质中的导电载流子在电场作用下的移动，可能被电介质中的缺陷或不同电介质的分界面所捕获，形成电介质中电荷分布不均匀而产生宏观感应电偶极矩。

电介质的极化程度是用单位体积电介质内在电场方向的电偶极矩即极化强度矢量 P 来度量

$$P = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\sum \mu_i}{\Delta V}$$

式中 $\sum \mu_i$ 是体积 ΔV 内在电场方向的感应电偶极矩的总和。在电场作用下，电介质表面束缚电荷的大小也反映电介质的极化程度，极化强度与介质表面束缚电荷面密度 σ' 的关系为

$$\sigma' = P_n = P\cos\theta$$

式中 P_n 为极化强度在介质表面法线方向的分量；θ 为表面法线与场强 E 的夹角。极化强度的单位是 C/m^2。

描述电介质极化的宏观参数是电容率，也称介电常数。

dianjiezhi laohua

电介质老化 (aging of dielectrics) 电介质受各种老化因素长期作用后发生的性能不可逆劣化现象。电介质中以有机电介质的老化问题最为突出。多数情况下，电介质老化是电介质的化学结构发生变化，即通过降解、氧化、交联等化学反应改变了电介质的组成和化学结构。例如，液体有机电介质老化时在表观上发生混浊、变色等，固体有机电介质老化时在表观上发生变色、粉化、起泡、发黏、脆化、出现裂纹或裂缝、变形等。电介质老化的另一种情况是其物理结构发生了变化，例如，固体有机电介质中所含的增塑剂不断挥发或电介质中的球晶不断长大，都会使电介质变硬、变脆、性能劣化。电力设备通常由结构材料、导电材料、磁性材料及有机电介质材料制成，其中以有机电介质最容易发生老化甚至发生击穿或其他形式的破坏，直接影响电力设备运行的可靠性或寿命。

根据老化因子的不同，电介质老化可区分为电老化、热老化、机械老化和环境老化等。

电老化　电介质在强电场、电流、放电、电化学等因子长期作用下的老化。电老化不仅在电力设备绝缘系统中存在，而且在工作电场强度较高的电子器件中也时有发生。因此，电老化直接关系到各种电气、电子设备的运行可靠性。按老化过程中是否有放电现象，电老化大致分为放电电老化和无放电电老化两大类。

（1）放电电老化。电老化的主要形式。在放电过程中会产生过热、局部烧蚀、紫外线辐射、活性粒子（包括高能电子、原子态的氧或氮、激发态的氧分子或氮分子，以及氧或氮的分子离子等）及其他产物（臭氧、二氧化氮）等加速老化因素，使电介质发生老化。

放电电老化主要取决于放电强度和环境因素。放电强度与放电类型有关。电晕放电的强度最低，老化主要由放电及空气中氧的协同作用所致；火花放电的强度较强，常在电介质的表面产生碳化导电痕迹；电弧放电的强度最强，对电介质的破坏力最大，破坏速度也最高。电介质在这些因素作用下，首先材料表面慢慢变白、变脆，接着表面发生粗化甚至出现凹坑，然后放电集中于凹坑并向电介质内部发展直到材料击穿。

放电电老化的表现形式有局部放电、电树枝化、水树枝化和电痕化。①局部放电是比较普遍的放电老化，常发生在电介质内部、间隙和沿面。局部放电产生带电粒子直接碰撞介质外层分子的 C—H 键，产生大量氢气；同时局部高温导

致热冲击及化学分解产生活性粒子。②电树枝化是聚合物电介质在强电场长时间作用下发生的一种老化现象。1958年在聚乙烯电缆绝缘中首先发现，在电介质中形成气化了的俨如树枝状的痕迹，“树枝”由直径为微米以下的细微“管子”构成。“树枝”可以在介质中局部电场集中处引发，因介质中间歇性的局部放电而缓慢扩展，更可以在脉冲电压作用下迅速发展。③水树枝化是聚合物电介质在电场和水联合作用下产生的树枝状（实际上呈蝶状、扇状等）痕迹。最早在潜水电机用聚乙烯绕组绝缘层中发现，也存在于聚乙烯地下电缆中，由凝聚水和微观空隙群组成。水树枝在远低于形成电树枝的电场下被引发，往往会进一步发展为电树枝直至击穿。④电痕化是在固体电介质上因局部放电形成的导电或部分导电的通道。引起电痕化的直接原因是火花放电或闪烁放电而非漏电流，老化因子主要是放电产生的高温和氧化作用，而不是放电产物或紫外辐射。

（2）无放电电老化。电介质在强电场、电热、电化学等非放电因子作用下的电老化。在电压作用下，电流通过材料产生热效应，若局部电流过大发生过热而引起老化；在直流电压作用下，通过电化学作用或空间电荷的作用使材料老化。其中电化学过程使金属导体被腐蚀，其残留物在电介质中或表面形成导电痕迹使绝缘性能丧失，电化学老化受电介质的结构组成、环境因素、电极材料和结构形式等影响。

热老化　电介质在热的长期作用下的老化，随温度升高而加速。

热老化的主要原因是：在热的作用下，有机电介质发生降解反应，包括使主链断链的解聚反应或无规断链反应和使侧基从主链上脱离的消去反应，从而产生大量低分子挥发物，并引起一系列更为复杂的反应。常见的是热氧化老化，即在热和氧协同长期作用下发生的老化。热氧化老化初期通常会出现过氧化氢物，过氧化氢分解产生自由基，然后引发出一系列氧化和断链化学反应，使分子量下降、含氧基团浓度增加，并不断挥发掉低分子产物，结晶度也随之变化。

机械老化　电介质受到反复多次的应力或应变后，力学性能发生不可逆降低直到断裂的现象——机械疲劳。对于大容量电力设备特别是发电机组，疲劳现象不容忽视。疲劳主要是由于反复受力或反复变形时电介质中的分子链发生断裂，聚集态变化，导致产生裂纹甚至裂缝，直到断裂；其次是因为电介质力学损耗过大，发热严重导致过热直到在高温下被撕裂。

环境老化　电介质在各种环境因素长期作用下的老化。这些因素中主要是自然环境因素。对电介质老化影响最大的环境因素有环境温度、湿度、太阳辐射、高能辐射、臭氧、工业有害气体、酸、碱、盐及其溶液、水、溶剂及油等。

电介质因接触酸、碱、盐、水、溶剂及臭氧等化学物质而被腐蚀所致的老化称为化学老化。化学物质容易使电介质中的碳—杂原子键发生水解、酸解、胺解等降解反应。臭氧可作用于电介质中的双键并使之断裂，在放电、光化学烟雾污染的地区都要注意臭氧老化问题。化学老化与化学物质在电介质中的扩散和渗透难易程度有密切关系。

一些物理因素可引起物理老化。太阳辐射老化主要由波长低于290nm的紫外线引起，紫外线光子使电介质化学键断裂或使分子处于激发状态；氧能促进紫外线的辐照老化作用。高能辐照老化是由α射线、β射线、X射线等高能粒子流的作用引起的，粒子能量可高达$10^2 \sim 10^8$ eV，可引起电介质的降解、氧化等反应；在原子能发电厂、加速器、反应堆周围以及航天飞行器中都应注意高能辐照老化问题。

多个老化因素之间往往有相互作用，实际电介质老化不能用各个单一因素引起的老化的简单综合来表示，应同时考虑多个因素，即所谓多因子老化。老化研究的主要目的是建立老化因子与绝缘老化过程特性参数变化的关系，并抽象出数学模型，然后通过试验进行验证。多因子老化试验可以真实模拟实际运行情况，但由于要考虑更多的老化因子，较单因子老化试验复杂得多。

dianjiezhi qiangchang daodian jili

电介质强场导电机理　(electrical conduction mechanism of dielectrics under high field strength)　在恒定强电场作用下，电介质中出现电流急剧变化的规律和本质。强电场作用下的电导主要为电子电导。不同聚集态电介质中电子的产生方式与迁移机制也有不同。以下按气体、液体、固体电介质分别介绍。

气体电介质中的电子在强电场作用下加速并积累能量，当电子的能量超过分子的电离能并与分子相碰撞时，使分子发生电离产生新的电子—正离子对。电子和正离子数急剧增加，气体电导显著增大。电流密度j与电极间距离d和电子碰撞电离系数α满足关系$j=j_0e^{\alpha d}$，其中j_0为气体电介质的初始阴极电流密度。

液体电介质在强电场作用下的电导为电子碰撞电离电导，电流随电场强度呈指数增长，有$j=j_0e^{C(E-E_C)}$，其中j_0为液体电介质在场强为E_C时的电流密度，C为常数。

固体电介质在强电场作用下的电导主要为电子电导。导电电子的来源包括来自电极和介质体内的热电子发射、场致冷发射、碰撞电离。导电电子的迁移机制有能带模型、电子跳跃模型和自由电子气模型等，如表所示。

固体电介质强电导的电子来源和迁移机制

电子来源	热电子发射	①阴极热电子发射 ②电介质电子发射，包括本征激发和杂质能级上的电子激发
	场致冷发射（隧道效应）	①阴极电子冷发射 ②电介质中电子由价带或者杂质能级向导带的发射
	电介质中的碰撞电离	
电子迁移机制	能带模型——晶体中电子电导	
	电子跳跃模型——非规则晶体中电子电导	
	自由电子气模型——空间电荷限制电流	

dianjiezhi ruochang daodian jili

电介质弱场导电机理　(electrical conduction mechanism of dielectrics under low field strength)　在恒定低电场作用下，电介质中出现微小漏电流的规律和本质。电介质导电机理取决于导电载流子的来源及其迁移方式。电介质通常处于高电阻绝缘状态，自由电子很少，在低电场作用下的主要导电载流子是离子。

载流子的分类和形成　按来源不同，作为载流子的离子有本征离子和杂质离子两类。本征离子由组成物质本体的分子

或晶格上的离子活化电离形成；杂质离子由杂质电离形成。以下按气体、液体和固体介绍电介质中导电载流子的产生形式。

气体电介质受到光、热、辐射等外因作用时，分子发生电离而产生正、负离子对，或使阴极发射出电子。气体分子由于外电离源的作用生成正离子-负离子对，或先形成正离子-电子对，电子再附着在分子上成为负离子。显然，气体中离子浓度的大小主要取决于光、热、辐射等电离源的强度。

液体电介质中载流子的来源包括本征离子、杂质离子和胶粒。本征离子由组成液体本身的基本分子因热离解而产生，在较强极性液体电介质中（有机酸、醇等）明显存在。杂质离子由外来杂质分子（水、酸、碱、有机盐等）或液体本身分子老化的产物（有机酸、醇、酚、酯等）离解而生成，是工程电介质中离子的主要来源。与低温下出现杂质离子电导不同，极性液体电介质在高温下才出现明显的本征离子电导。此外，为了改善液体电介质的某些物理化学性能（例如，提高黏度和抗氧化稳定性），往往在液体介质中加入一定量的树脂，这些树脂在液体电介质中部分呈悬浮胶粒；水分进入某些液体电介质也能形成乳化悬浮胶粒。当胶粒的电容率大于液体的电容率时，胶粒带正电；反之，胶粒带负电。这些胶粒是液体电介质中的导电载流子，在电场作用下作定向迁移构成电泳电导。

固体电介质中的离子来源与物质结构有关。晶体无机电介质的离子包括本征离子和弱束缚离子。本征离子是离子晶体点阵上的基本粒子，在热振动下，少量本征离子可能离开点阵成为载流子；与晶体点阵联系较弱的弱束缚离子可以活化而成为载流子，杂质离子和晶体位错与宏观缺陷处的弱束缚离子引起的电导属于杂质电导。非晶无机电介质的离子主要由掺杂金属离子产生。有机电介质不存在本征离子，导电离子来源于杂质。通常离子晶体电介质在低温下出现杂质离子电导，高温下才出现明显的本征离子电导。

载流子的迁移方式　主要有两类：漂移方式和热跃迁方式。①漂移方式。气体电介质中的离子在电场作用下，在自由行程区间内受到定向加速，取得定向迁移速度，形成电导电流，这种迁移方式称为漂移方式。液体中电泳电导、固体中自由电子的迁移与此类似。②热跃迁方式。在液体和固体电介质中的离子，由于被周围分子或离子所形成的势阱所束缚而不能较自由地迁移，仅能在势阱中作热振动，当热振动能超过势阱才能发生跃迁。外电场可以改变势垒的高度，因而形成非对称的跃迁，导致宏观上有部分载流子沿电场方向有定向的迁移。这种迁移方式称为热跃迁方式。电导率与温度呈指数关系变化，温度上升电导率激烈增加。多数液体、固体电介质中的离子以热跃迁方式输运。

根据电介质的组成、结构，以及温度、压力、电场的不同，电介质的导电机理会有所变化，特别是强电场下将有明显的电子电导和电离电流出现。

dianjiezhi sunhao

电介质损耗　(dielectric dissipation)

电介质从交变电场中吸收并以热的形式耗散的能量。它将引起电介质发热、温度升高，从而加速电介质的老化。

电介质损耗来源于两个方面：①由电介质电导形成的漏电流在交变电压下具有有功电流的性质，由它引起的能量损耗称为电介质电导损耗。如电介质的电导率为 γ，外加电场强度为 E，则其电导损耗为 γE^2。②由电介质中与时间有关的各种极化过程所引起的能量损耗。电介质中各种极化的建立过程都需要一定的时间，当外加电场变化频率增高以致与某种极化建立过程所需要的时间可比时，这种极化就变得逐渐来不及建立而呈现滞后效应，因而产生损耗，这种损耗叫做松弛损耗。以上这两种损耗在外电路上表现为通过电介质的电流不再是理想的电容电流，其导超前相位角不再是 $\pi/2$，而等于 $\pi/2-\delta$。δ 是这种电介质的电流相对于理想电容电流相位角的滞后角，称为损耗角。此时的电介质电流包含一个与外加电压同相位的有功部分，即产生电介质能量损耗的部分。定义电介质电流的有功部分与其无功电流部分之比的 $\tan\delta$ 作为表示电介质损耗特性的参数，称为介质损耗角正切。它是最常用的表示电介质损耗大小的物理量，是一个无量纲数。一般来说，电介质的 $\tan\delta$ 越小越好，但对不同条件下使用的电介质要求可以不同。在工频范围内用作绝缘材料的电介质，$\tan\delta$ 应小于 $10^{-3}\sim10^{-4}$。在利用电介质损耗发热作为加工手段的情况下，则应优先选择 $\tan\delta$ 较大的电介质材料。在高压绝缘技术中，介质损耗角正切还是考核高压设备工作稳定性的质量指标之一。当设备运行中出现 $\tan\delta$ 随时间迅速上升的现象时，就预示着电介质的绝缘性能正在迅速劣化，必须采取适当的安全措施。

介质损耗角正切是环境温度、电压与频率的函数。它随温度和频率变化的规律大致是：当频率较低或温度较高时，松弛极化完全能跟得上外电场的变化，松弛损耗很小，主要是电导损耗，$\tan\delta$ 随频率上升成反比下降；当频率很高或温度较低时，松弛极化由于跟不上外电场的变化而不发生时，松弛损耗趋于恒定值，$\tan\delta$ 亦随频率上升而下降。在极化可以发生而又有所滞后时，$\tan\delta$ 出现最大值。电场不太强时，电介质损耗与场强大小无关；但在电场足够强时，在一些与强电场有关的因素如局部电子发射和气隙局部放电等的影响下，$\tan\delta$ 将随场强增强而增大。

dianjiezhi zudang fangdian

电介质阻挡放电　(dielectric barrier discharge，DBD)

放电空间存在固体电介质的一种非平衡态气体放电，又称介质阻挡电晕放电或无声放电。在两个放电电极之间充满某种气体，并将其中一个或两个电极用固体电介质覆盖，也可以将固体电介质直接悬挂在放电空间或采用颗粒状的电介质填充其中，当电极上加以一定电压时，极间电场可能使极间空间的气体分子电离，产生增长的放电电流，所产生的带电粒子在电场作用下沉积在电极表面的电介质层上，形成壁电荷电场，又逐渐抵消了外电场，以致使放电猝灭。当极间电场反向时，又会发生上述过程。电介质阻挡放电实际上是一种放电的暂态过程。只有当电极上加以交流电压时，放电才能连续工作。在低频工作时，放电特性呈一系列电脉冲。高气压放电时，其形态由许多随机分布的微放电构成。电介质阻挡放电能够在 $10\sim10^5$ Pa 宽泛气压范围和 $10\sim10^6$ Hz 频率范围内工作。

电介质阻挡放电的电极结构形式多种多样，常见的有同轴管线式电极结构和平板式电极结构。同轴管线式的电极结构被广泛应用于各种化学反应器中，而平板式电极结构则被

广泛应用于工业中的高分子和金属薄膜及板材的改性等。其他应用还包括臭氧合成、紫外与真空紫外光源、等离子体显示、气体激光器激励以及环保等方面。

diankang

电抗

（reactance） 见相量法。

dianlan jueyuan de zaixian zhenduan

电缆绝缘的在线诊断

（on-line insulation diagnosis of power cable） 对运行状态下的电缆绝缘进行试验和各种特性测量，分析其特征，并对绝缘状态作出判断的技术。推行和发展电缆绝缘在线诊断技术，能在早期发现故障，提高输电系统的运行可靠性。电力电缆绝缘在线诊断的项目有：①泄漏电流；②介质损耗因数 tanδ；③局部放电；④局部过热。

泄漏电流　电缆绝缘泄漏电流在线测量通常采用叠加法进行，借助于电感线圈，将直流电压或低频交流电压在线地通过互感器叠加到运行的电缆绝缘上，通常采用微电流传感器来检测流经电缆接地线泄漏电流信号，传感器的输出信号经放大、滤波、数据采集后送计算机分析、储存，根据泄漏电流的大小判断电缆绝缘的老化程度。

介质损耗因数 tanδ　电缆绝缘介质损耗因数可利用电桥法直接测量（参见电容率与损耗因数试验），也可通过先测量流经电缆绝缘电流 i 超前绝缘两端电压 u 的相位 φ，再按公式计算介质损耗角 $\delta=(\pi/2)-\varphi$。介质损耗因数反映的是电缆绝缘的整体老化程度，对集中性缺陷反应不灵敏。

局部放电　采用测量放电脉冲信号的方法来监测电缆的局部放电（见局部放电试验），采用的传感器为罗戈夫斯基线圈型电流传感器或电容型耦合器。可利用电缆接地线穿越罗戈夫斯基线圈型电流传感器的磁芯，检测放电信号。也可在电缆端部或连接处加设金属电极，使其与电缆芯线形成耦合电容，通过检测阻抗检测放电信号。传感器的输出信号经放大、滤波、数据采集后送计算机分析、储存。要采取各种措施来抑制现场强烈的电磁干扰。可根据视在放电量或根据 φ-q-n（φ：放电发生时的工频电压相位；q：放电量；n：放电重复率）三维谱图用人工神经网络进行判断。

局部过热　电缆温度可利用半导体温度传感器或光线温度传感器进行监测。可通过安装在电缆连接处的半导体温度传感器，检测电缆的局部过热程度。也可将光纤温度传感器沿轴向埋入电缆中，当激光脉冲通过光纤时，所产生的喇曼散射与光纤温度相关，可通过测量返回到光纤入射端的散射光确定喇曼散射点的温度和热点的位置。

dianli

电离

（ionization） 中性原子或分子转化为带电的原子或分子（离子）的过程。电离也可延伸为已电离的原子获得净增电荷量的过程。电离的逆过程是复合，即电子（或负离子）和正离子碰撞后形成中性原子或分子的过程。电离过程能产生带电粒子，是气体放电中最重要的基本过程之一。

当中性原子或分子从外界获得足够的能量，使某个电子获得的能量足以克服原子核的引力而成为自由电子，并留下带正电的离子时，就产生了电离。电离所需的能量称为电离能或电离电位，单位为 eV（电子伏）或 V。移去第二个电子所需的能量称为第二电离能或第二电离电位。

强电磁辐射、电子束、离子束、中性粒子束、宇宙射线、冲击波和高温等外界因素都会造成气体原子或分子的电离。

按电离发生的机理可分为碰撞电离、光电离和热电离。

碰撞电离　具有足够能量的粒子（电子、离子、中性粒子等）和中性原子或分子相碰撞，使后者得到的能量大于电离能，形成电子和正离子对的电离过程。

粒子之间产生碰撞电离的可能性用碰撞电离截面来表示，单位为 m²。各种碰撞电离截面均可采用实验方法来测定，也可用经典理论或量子力学理论计算。

由电子和中性原子或分子之间的碰撞而引起的电离是最主要的一种碰撞电离，它可表示为

$$e+A\rightarrow(n+1)\ e+A^{n+}$$

式中 e 表示电子；A 表示原子；$n=1, 2, 3, \cdots$分别表示一次电离、二次电离、三次电离……；A^{n+} 表示 n 次电离的正离子。电子的电离截面，开始时随电子能量的增加而增加，到某一最大值后又逐渐下降，见图 1。有时电子的能量不足以直接电离原子，而是先把原子激励到某一亚稳态，然后其他的电子和亚稳态的原子相碰撞而形成所谓的分级电离。

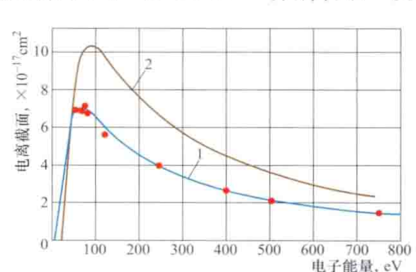


图 1　电子碰撞引起的氢原子和氢分子的电离截面
1—H；2—H_2

当入射粒子的能量很高时，常常会发生多次电离的现象（$n\geqslant2$）。图 2 所示为氩气中发生多次电离的电离截面。

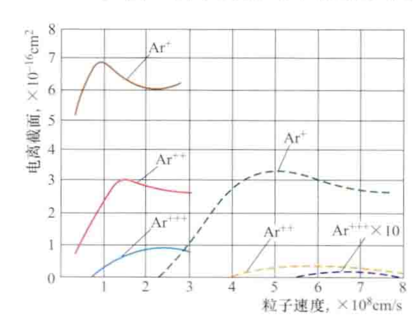


图 2　氩气中多次电离的电离截面
实线—He⁺ 碰撞引起 Ar 原子的电离；
虚线—电子碰撞引起 Ar 原子的电离

光电离　波长足够短的电磁辐射穿过气体时引起的电离。单个光子的能量 $h\nu$（h 为普朗克常数，ν 为光频率）等于或超过气体原子或分子的电离能 W_i 即 $h\nu\geqslant W_i$ 是发生光电离的条件。

大多数原子的电离能 W_i，对应于紫外光谱区的光子。光电离的可能性用光电离截面来表示，单位为 m²。光子能量接近阈值 W_i 时，截面突然上升；当光子能量再增加时，截面又下降。

当单个光子能量不够时，往往可能发生双光子或多光子电离。即第一个光子使原子跃迁到某个激励能级，在没有去激励之前，另外的光子射入，补足电离所需的能，而引起电离。在强激光束的照射下，因为光通量很高，易发生多光子电离。

紫外线、X 射线、γ 射线以及强激光等都会产生光电离。光电离不仅发生于外界入射的光辐射，也发生于气体放电本身所产生的光辐射。光电离在气体放电的发展过程中起

着重要作用。

热电离　气体加热到很高的温度时所引起的电离。在一定温度下，气体中各个分子的运动速度各异，其速度分布服从麦克斯韦分布，大多数气体分子的速度都在某个“最可几速度”附近，速度很高和很低的分子数均很少。在温度很高时，有少部分的分子具有很高的运动速度，其热运动的动能超过电离能时，分子间的碰撞就会造成电离。此外，高温气体的热辐射会引起电离；热电离过程所产生的高能电子也会引起电离。

在高温气体中，一方面是电离的过程，另一方面是复合过程。在热力学平衡下，电离所产生的离子数应等于复合而消失的离子数，此时气体的电离度 α 可用沙哈（Saha）公式表示

$$\alpha = n_i/n_0,\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = \frac{4.9\times10^{-4}}{p}\frac{g_i}{g_a}T^{2.5}\times\exp\left(-\frac{W_i}{kT}\right)$$

式中 n_i 是离子的数密度；n_0 是电离前中性粒子的数密度；p 是气压（以多少个 133Pa 表示）；T 是温度，K；W_i 是气体原子或分子的电离能，eV；k 是玻尔兹曼常数，eV/K；g_i 和 g_a 分别为离子和原子的统计权重。

dianli dianzi mokuai

电力电子模块

（power electronics module）　将多个相同的电力电子器件或多个相互配合使用的不同电力电子器件封装在一个模块中，以实现一个大功率等级或者具备典型拓扑结构的功率单元。通过模块的标准化，可以减小功率电路的体积，提高可靠性，降低成本。

分类　主要包括功率模块、单片式集成模块和混合式集成模块三种基本类型。

功率模块　只包含功率器件的模块。已经开发出整流管模块（10～12 000A，100～30 000V），晶闸管模块（100～1000A，300～2000V），整流管—晶闸管模块（100～1100A，100～4000V），GTO（gate turn-off thyristor）模块，IGBT（insulated gate bipolar transistor）模块等。IGBT 基本单元模块由 1 个 IGBT 和 1 个反并联二极管构成，需要更大电流的场合可以用几个基本单元并联。二单元 IGBT 模块由 2 个 IGBT 基本单元串联构成，3 个二单元 IGBT 模块就可以构成三相 PWM 变频器。此外，典型的组合方式还有六单元 IGBT 模块和七单元 IGBT 模块等。

单片式集成模块　将功率器件、驱动、控制、保护等电路集成在一片硅片上形成。体现了片上系统（system on chip，SOC）的思想，即将所要集成的所有元器件都采用统一的加工工艺和技术，集成在同一基片上。典型代表为开关电源专用三端单片集成模块 TOPSwitch，它具有软启动、线性限压检测、远程通断控制、在线热关闭选通等功能，并可调至零负载和由用户设置精确的限流值等。单片集成模块简单，应用方便，但功率元件的发热量很大，而其他元件的发热很少，造成硅片温度分布极不均衡，传热、隔离等问题还没有有效解决。而且高电压、大电流功率器件和控制电路等不同结构、要求的半导体元器件的制造工艺极为不同，在同一芯片上集成的难度较大，这种集成方法只适用于小功率电力电子电路。

混合式集成模块　将纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路采用混合集成的方法，通过多层布线与互连，将多个不同工艺的硅片安装、连接在一起，封装在一个模块中构成。混合式集成模块中除了具备有功率半导体器件外，还包含驱动电路、控制电路、传感器、保护电路、辅助电源及无源元件等。在现有技术条件下完全实现这样一个电力电子集成模块还有一定困难，学术界将混合式集成模块划分为无源模块和有源模块两类，分别进行研究。无源模块主要实现磁性元件、电容等无源元件的集成；有源模块重点实现功率器件、驱动控制电路和传感器等的混合集成。

封装　电力电子组件器件的封装工艺，在保证实现模块功率集成、提高功率密度的同时，还需要能够快速散热、减小寄生参数以及适应多种工作环境。主要包括基板技术、互连技术和封接技术三个方面。

基板技术　电力电子组件器件的管芯所直接焊接的高导热率的基板，广泛使用金属绝缘基板和陶瓷基板两种。金属绝缘基板由金属基板层、绝缘层和覆铜电路层构成。陶瓷基板由导电互连层和绝缘陶瓷层构成，各层材料在高温烧结下紧密地焊接在一起。根据导电互连层与绝缘陶瓷层烧结温度的不同，分为高温共烧陶瓷基板（high temperature co-fired ceramic substrate，HTCC）和低温共烧陶瓷基板（low temperature co-fired ceramic substrate，LTCC）。陶瓷基板比金属绝缘基板具有更高的导热性和更大的承载电流能力，广泛应用于高散热功率及高热失效的场合。

互连技术　主要有以下四种：引线键合互连工艺、双面焊接互连工艺、沉积金属化互连工艺和压接互连工艺。①引线键合互连工艺，包括铝丝互连工艺、铜丝互连工艺和金丝互连工艺。加工工艺成熟、成品率高，90%以上小功率等级电力电子模块均采用这种工艺。②双面焊接互连工艺，采用焊料焊接在功率管芯表面进行互连，增加了管芯表面的互连面积、降低互连的电流密度以及运行中的热应力和机械应力，实现功率管芯的双面散热。③沉积金属化互连工艺，包括功率覆盖技术和嵌入式功率技术。对硅片采用沉积金属薄膜工艺进行金属化处理，使其成为可焊接的平面，有利于模块内实现三维互连，进一步提高封装密度。④压接互连工艺，通过在封装模块上下施加一定的压力，实现金属电极之间的良好电气连接。克服了功率模块在 100℃ 高温度循环后由机械应力引起的铝丝拔起、焊料层断裂等问题，主要用于大功率电力电子组件器件。

封接技术　将制作完成的电力电子电路密封在塑料、玻璃、金属或陶瓷外壳中，对模块起到机械支撑、屏蔽、防水、防潮、隔绝空气、电绝缘等多种保护使用，以确保模块在各种恶劣环境下正常工作。

dianli dianzi qijian

电力电子器件

（power electronic device）　应用于电力电子技术领域进行电能转换、控制和传输的功率半导体器件，又称电力半导体器件（power semiconductor devices）。它是电力电子技术的基础和重要组成部分，应用范围涉及电力工业、工业电源、汽车电子、电机传动和家用电器等诸多领域。

分类　根据开关特性或载流子导电情况，电力电子器件有两种常见分类方法。

（1）根据器件的开关特性，分为不控型器件、半控型器件和全控型器件三种类型。①不控型器件：只有整流作用，没有

控制功能，如功率二极管、肖特基二极管等。②半控型器件：通过控制信号，只能控制其开通而不能控制其关断，如普通晶闸管及其派生器件。③全控型器件：通过控制信号，既可以控制其开通，又可以控制其关断，如功率MOSFET等。

（2）根据器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况，可分为单极型、双极型和混合型三种类型。①单极型器件：内部只有一种载流子参与导电，如功率MOSFET。②双极型器件：内部有电子和空穴两种载流子参与导电，如普通晶闸管、门极可关断晶闸管等。③混合型器件：由单极型和双极型器件组成的复合型器件，如绝缘栅双极型晶体管（IGBT）。

常用电力电子器件 主要包括以下八种：功率二极管、双极型功率晶体管、普通晶闸管及其派生器件、绝缘栅场效应功率晶体管、绝缘栅双极型晶体管、门极可关断晶闸管、MOS控制型晶闸管和集成门极换向晶闸管。图1～图3分别为电力半导体器件、大功率二极管和大功率晶闸管。

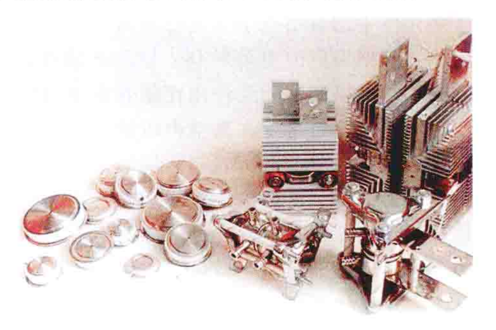


图1 电力半导体器件

功率二极管 工作原理与普通二极管相同，只是功率等级更高，在电解、电镀等大功率电路中应用广泛。包括结型功率二极管、功率齐纳二极管、肖特基势垒二极管、快恢复二极管等。



图2 大功率二极管

双极型功率晶体管 集电极具有一定耗散功率的双极型半导体器件。通常指集电极耗散功率在1W以上的晶体管，具有耐压高、工作电流大、自身耗散功率大等特点。分为通用低频功率放大管、高频功率管和高反压开关管三大类。其中以电力晶体管GTR（giant transistor）为代表的高反压开关管曾广泛用于电力电子技术诸多领域。



图3 大功率晶闸管

普通晶闸管及其派生器件 普通晶闸管（12kV/1kA，这里的参数是指目前产品的制作水平）是具有PNPN四层结构的各种开关器件的总称。其派生器件包括快速晶闸管（3000V/500A）、逆导晶闸管（2500V/1600A）、双向晶闸管（2000V/500A）、光控晶闸管（8000V/3600A）等。晶闸管的应用受到一定局限，原因是：晶闸管属于半控型器件，关断需要依靠电网电压等外部条件来实现；工作频率不高，一般难以高于400Hz。

绝缘栅场效应功率晶体管 一种单极型可关断器件，简称功率MOSFET（metal oxide-semiconductor field-effect transistor）。它无少数载流子存储效应，因而开关时间短，开关频率可达500kHz甚至几兆赫兹以上（是电力电子器件中开关频率最高的）。制作水平达1kV/2A/2MHz和60V/200A/2MHz等级。功率MOSFET的特点：输入阻抗高和开关损耗低；有良好的电流自动调节能力；无二次击穿，广泛用于中小功率电力电子器件市场。

绝缘栅双极型晶体管 一种兼有MOSFET低驱动功率和电力晶体管低通态压降优点的混合功率器件，简称IGBT（insulated gate bipolar transistor）。其特点是电流密度高，开关损耗低，安全工作区宽，没有电力晶体管所固有的二次击穿问题，表现出很好的综合性能。IGBT已模块化，正向着具有门极驱动和过电流保护电路的“智能”IGBT模块进展，是工业领域应用最广泛的电力电子器件。随着高压、大电流IGBT的普遍应用（3200V/1300A），已经逐步取代了电力晶体管，占领了GTO的部分应用领域。

门极可关断晶闸管（gate turn-off thyristor，GTO） 高压大电流双极型器件，已达9kV/25kA/800Hz及6Hz/6kA的水平。可用正门极脉冲电流导通，亦可用负门极脉冲电流关断，开关频率1～2kHz。主要用于高压大电流逆变器和斩波器中。

MOS控制型晶闸管（MOS controlled thyristor，MCT） MCT实质上是一个MOS门控制的PNPN晶闸管。它将MOSFET的高输入阻抗、低驱动功率和快速开关的特性与晶闸管的高压大电流特性结合在一起，可以在MOS门上加一窄脉冲使其导通或关断，其频率特性与IGBT相似。高阻断电压和低通态压降是它的明显优点，且不存在二次击穿问题。已研制出阻断电压达4000V的MCT，75A/1000V MCT已应用于串联谐振变换器。

集成门极换向晶闸管（intergrated gate commutated thyristors，IGCT） 一种新型电力半导体器件。它将门极换向晶闸管及其驱动电路结合在一起，兼有晶体管稳定的关断能力及晶闸管低通态损耗的优点。研制水平达4500V/1700A，适合电流大、电压高、开关频率高的场合使用。

电力电子模块 将多个相同的电力电子器件或多个相互配合使用的不同电力电子器件封装在一个模块中，以实现一个大功率等级或者具备典型拓扑结构的功率单元。主要包括功率模块、单片式集成模块和混合式集成模块三种基本类型。其中功率模块与驱动、控制、保护电路是分离的，而单片式集成模块和混合式集成模块中的功率器件与驱动、控制、保护等功能是集成为一体的。

碳化硅器件 使用碳化硅材料制造的电力电子器件。包括肖特基二极管、功率MOSFET、IGBT和晶闸管等。碳化硅具有禁带宽度宽、击穿场强高、热导率高、热稳定性好等特点。理论分析表明，用碳化硅制作的功率MOSFET，其通态电阻只有同等级硅功率MOSFET的1/200，而工作频率却提高10倍以上。肖特基二极管作为21世纪首例市场化的碳化硅电力电子器件，现已获得非常广泛的应用。

发展历程 1957年第一个晶闸管的问世标志了电力电子技术的诞生，至今已发展出一个庞大的晶闸管系列。20世纪80年代初以来，各种高频全控型器件如功率MOSFET、IGBT不断问世，并得到迅速发展。20世纪90



图4 中国广东东莞 200Mvar StatCom 阀组

年代初，电力半导体器件又迈向集成化和智能化。电力电子器件组件为整机的设计、制造提供方便，提高了系统的可靠性和性能。随着碳化硅（SiC）晶体晶质的提高，已研究开发出新型的碳化硅功率二极管和 4500V 的 SiC-MOSFET。可以预见，碳化硅器件将成为功率器件研究领域的主要潮流之一。图 4～图 7 所示为电力电子器件在直流输电工程中的应用。



图 5 中国广东南澳柔性直流输电工程阀厅



图 6 中国向家坝—上海±800kV 直流输电工程 奉贤换流站



图 7 中国青藏交直流联网工程 ±400kV 拉萨换流站阀厅

参考书目

王兆安，刘进军．电力电子技术．5 版．北京：机械工业出版社，2009.

dianliu

电流（electric current） 单位时间通过某个截面的电荷净转移量。设时间 Δt 内流过某一截面的电量为 Δq，则流过该截面的电流 i 为

$$i=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta q}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$$

国际单位制（SI）中，电流的单位是安［培］(A)。由于习惯原因，电流的正方向规定为正电荷运动的方向。这样，金属导体中的电流方向是带负电荷的自由电子流动的相反方向。半导体及电解液中的电流有的是由空穴、带电离子等载流子的运动形成的。

电流的分类 电流按载流子的有无及其在不同材料中的运动情况可分为：传导电流、运流电流和位移电流。传导电流是介质中的自由电子（或带电离子）在电场作用下穿过介质原子晶格形成的电荷转移。这种电流在电荷运动过程中，载流子与晶格间的相互作用伴随着能量的转换，产生热能损耗。运流电流是电荷在真空中运动或者依附在运动物体上为其所搬运而形成的电荷转移。例如，真空中一束电子或离子在电场力作用下所形成的宏观运动。这种电流不产生局部发热。位移电流则是根据麦克斯韦的假设，电通密度通量随时间变化时引入的电流。考虑了位移电流后在电介质或真空中电流满足连续性原理。

恒定电场作用下的电流，又称直流电流。电流的量值随时间而脉动变化的称脉动电流。如电流不仅大小随时间变化，而且流动方向也周期性地变换的称交变电流。

电流密度 在有电流通过的区域内，设沿电荷运动方向取一垂直截面元 ΔS_n，流过 ΔS_n 的电流为 ΔI，当 ΔS_n 趋向物理无限小时，该点的电流密度 J 为

$$J=\lim_{\Delta S_n\to 0}\frac{\Delta I}{\Delta S_n}=\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S_n}$$

如面元不与电流流动方向垂直，则 $\mathrm{d}I=\boldsymbol{J}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}$，$\boldsymbol{J}$ 的方向由该点正电荷运动方向确定。电流密度 $\boldsymbol{J}$ 是矢量，通常是空间和时间的函数，单位是安［培］每平方米（A/m^2）。

电流连续性原理 电荷守恒定律在电磁场中的具体反映。由于电荷守恒，从空间任一闭合曲面 S 中流出的全部电流，应等于该曲面所围体积 V 内的电荷随时间减少的变化率，其数学表达式为

$$\oint_S \boldsymbol{J}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=-\int_V\frac{\partial\rho}{\partial t}\mathrm{d}V$$

式中 ρ 是电荷密度。相应的微分形式是

$$\nabla\cdot\boldsymbol{J}=-\frac{\partial\rho}{\partial t}$$

恒定电场中 ρ 不随时间变化，电流连续性原理可简化成

$$\oint_S \boldsymbol{J}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=0$$

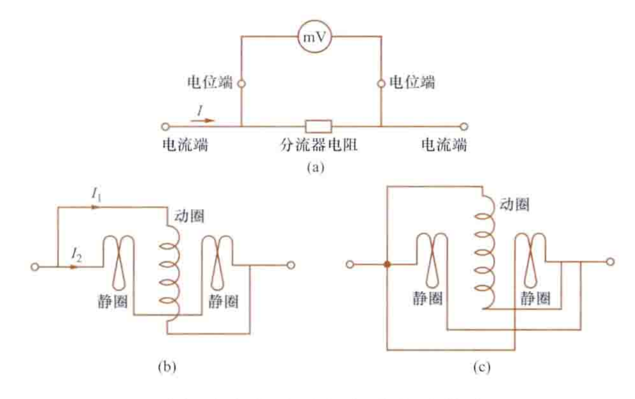
此式与电路中的基尔霍夫第一定律（电流定律）相对应（见基尔霍夫定律）。

电流的电场与磁场 恒定电流伴随有恒定电场，同时在其周围还存在着恒定磁场。由于此时的电场与磁场均不随时间而变，可分别单独考察电场和磁场。若电流随时间而变，特别是随时间变化率很大时，就要统一考虑电场和磁场及它们之间的相互作用。

dianliu biao

电流表 (ammeter) 测量直流、交流电流量值的电表。可分为直流电流表和交流电流表两大类。

直流电流表 主要采用磁电系或电动系测量机构（见机械式指示电表测量机构）制作，可直接测量小电流。对直流大电流的测量，磁电系测量机构需要配备分流器即并联电阻，使被测电流的大部分被分流。被测电流小于 10A，多采用内附分流器；对更大电流，则使用专用分流器。分流器采取四端结构，见图（a），它有两个电流端和两个电位端。分流器电阻值的选择条件为：当标称电流通过分流器时，其两电位端之间的电压为 45mV 或 75mV；以量程为 45mV 或 75mV 的磁电系电压表测此电压值，而表盘上则以电流值刻度。对以电动系测量机构制作的电流表，扩大测量电流量程的方法有：①加粗静圈导线线径，同时减少其匝数，保持安匝数不变；②将两静圈由串联改为并联［图（b）、图（c）］，可使量程扩大一倍。利用分流器和数字电压表可构成直流数字电流表。



磁电系与电动系机构量程的扩大

（a）分流器；（b）两静圈串联；（c）两静圈并联

交流电流表 可采用电磁系或电动系测量机构构成。为使磁电系测量机构也能用于测量交流电流，可利用整流器或热电偶，先将交流电流转换为直流电流；由它们组合而成的电流表分别称为整流式电流表（见整流式电表）或热电式电流表。为扩大可测交流电流的量程，整流式电流表采用分流器，电动系电流表的做法同前，电磁系电流表则是加粗线圈导线线径、减少匝数。对更大的交流电流的测量，需配合使用电流互感器。通常可利用分流器和交流数字电压表构成交流数字电流表。

各种电流表的量限、使用频率范围及可能达到的最高准确级等见表。

电流表的量限、使用频率范围及最高准确级

电表种类		量程（A） 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 10^{0} 10^{2} 10^{4}	使用频率范围（10^nHz） 直流 $n=$ 1 2 3 4 5 6	最高准确级
模拟	磁电系	*	▪	0.05
	电磁系	* *	▪	0.1
	电动系	* *	▪	0.05
	整流式	*		0.5
	热电式		▪	0.5
数字电流表			▪	0.01

* 测大电流时须配合专用分流器使用。
** 测大电流时须配合电流互感器使用。

若被测电流波形是非正弦的，对电磁系、电动系、热电式电流表测量性能的影响较小。整流式电流表限定用于正弦波形下，数字电流表也有类似限制。对电力系统中非正弦电流的测量，可采用变换器式电流表。

dianliu huganqi

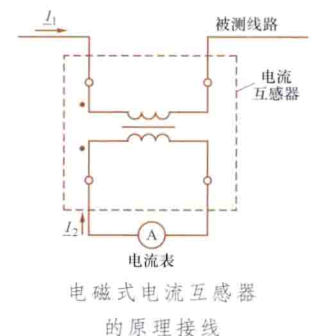
电流互感器 (current transformer) 将待测交流电流按额定比值进行量值变换的仪器。

电流互感器有测量用与保护用之分。测量用电流互感器的主要功能及特点是在被测系统正常运行时：①扩展电表量限，测量电流，提供给其他测量电表，以计量电能的产生或消耗，监测、记录被测系统的运行状态；②将不同额定值的大电流变换为统一的电流标称值，以利于所接测量电表的标准化；③使测量电表与被测系统的高电位隔离，以保证安全。此外，精密的测量用电流互感器可作标准仪器，用以检定准确级别至少低两级的测量用电流互感器，或与标准表配合，扩展其量限，检定相应测量电表。保护用电流互感器则主要在被测系统非正常运行和故障状态下，将被测电流变换后，提供给继电保护装置，以启动相关设备清除故障，并对故障进行监视和记录。

电流互感器主要是电磁式电流互感器，可直接输出数字量信号的电子式电流互感器已得到应用。

电磁式电流互感器 基于铁芯上两绕组之间的电磁感应作用实现的交流电流量值变换的仪器。

电磁式电流互感器的接线如图所示。由于有供给铁芯励磁和功率损耗的励磁电流 $\underline{I}_0$，一次电流 $\underline{I}_1$ 通常不正好等于折算后的二次电流 $K_{In}\underline{I}_2$，从而出现了比差 f 和角差 δ。K_{In} 为额定电流比；比差 f 的表达式为 $f=\frac{K_{In}I_2-I_1}{I_1}\times 100\%$；角差 δ 为 $\underline{I}_1$ 与反转 180° 后的 $\underline{I}$ 之间的相角差值。



电磁式电流互感器的原理接线

电子式电流互感器 基于光学和电子学原理实现交流电流量值变换的仪器（见电子式互感器）。

电流互感器的额定一次电流由 5A 到几十千安不等，具体数值见中国国家标准 GB 1208—2006《电流互感器》；其额定二次电流有 5A 及 1A。精密电流互感器除有上述额定值外，额定一次电流可低到 0.1A 以下；且其二次电流还有 0.5A 及 0.1A 等额定值。

电流互感器的准确级别分为 0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0 级等。

使用电流互感器时应注意：①二次侧严禁开路；②高压电流互感器的二次侧必须接地；③二次负荷不应超出其准确级别规定的负荷范围；④其变比的选择，应保证电力设备正常运行时，电表指示在满刻度的 2/3 以上。

dianliuyuan

电流源 (current sources)　通过的电流与其端电压无关的有源元件。它是一个二端电路元件，通过其中的电流保持为一恒定值或一确定的时间函数，而端子间的电压可为任意值，随所接外电路的不同而不同。当电流源的电流为某一恒定值时，称其为直流电流源；当为某一时间函数时，则可按其具体的函数形式而定名，如正弦电流源、方波电流源等。在电路理论中，电流源一般用图1所示的图形符号表示。

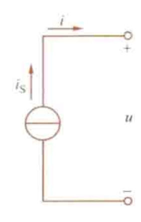


图1　电流源的图形符号及电路

电流源的电压、电流关系，在如图1所示的参考方向下，可表示为

$$\begin{cases} i = i_S \\ u \text{ 可为任意值} \end{cases}$$

若把电压 u 和电流 i 分别取为纵坐标和横坐标，所画出的电压、电流关系曲线称为伏安特性曲线。直流电流源的伏安特性是一条与 i 轴交于 I_S 且与 i 轴垂直的直线，如图2所示。

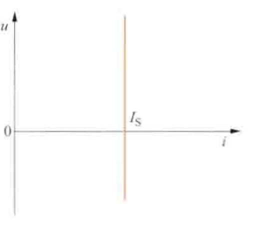


图2　直流电流源的伏安特性

实际电流源中，光电池、电子稳流电源等的伏安特性近似于直流电流源，但其端子电流会随着端电压的增加而有所减小，如图3所示。这时电源的电路模型可用一个电流源和一个电阻的并联电路来表征，如图4所示。图中 R_S 称为电源的内阻。当端电压为 U 时，直流电源端电流的变化 $\Delta I = I_S - I$ 可视为其内阻上的分电流，即 $\Delta I = U/R_S$。

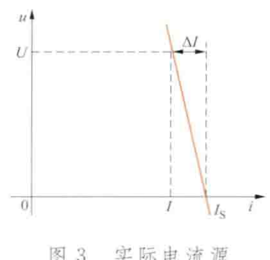


图3　实际电流源的伏安特性

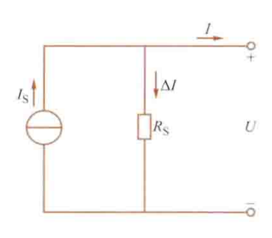


图4　实际电流源的一种模型

dianlu

电路 (electric circuit)　电流可在其中流通的由导体连接的电器件的组合。电器件包括电阻器、电容器、电感线圈、发电机、电动机、变压器、晶体管、晶闸管等。根据一定的目的，把所需的器件，用导线相连即组成电路。电路是电力系统、控制系统、通信系统、计算机硬件等电系统的主要组成部分，起着电能和电信号的产生、传输、转换、控制、处理和储存等作用。如，在电力系统中，发电机通过汽轮机或水轮机把热能、核能或水能等转换成电能后，通过变压器、输电线把电能输送给用户；用户的电动机、电灯、电炉等便可将电能转换为所需的机械能、光能、热能等。供给电能的设备称为电源，用电的设备称为负载。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“电路”部分。

参考书目

邱关源，罗先觉．电路．5版．北京：高等教育出版社，2006.

江缉光，刘秀成．电路原理．2版．北京：清华大学出版社，2006.

dianlu yuanjian

电路元件 (electrical circuit elements)　电路理论中，具有独立电磁特性的最小单元。电路元件的电磁特性，由元件的电压、电流、磁通量、电荷等电磁量之间的关系描述。如电阻的特性用欧姆定律描述，把电阻接在电路的任何地方，电阻的特性不变，因此称作独立的电磁特性。最常见的电路元件有电阻、电感、电容，电压源、电流源和受控源等，它们的图形符号如表所示。

电路元件和实际的电器件　实际的电器件是实物，如白炽灯、绕线电阻、电力电容器、变压器、同步发电机、晶体管等。除端钮间的电磁特性外，实物的内部有着电磁场的分布特性，还有力学、热学等方面的特性。电路理论中的电路元件和它们的组合则不是实物，只是反映实物的端钮间电磁特性的模型。如电阻常用来作为白炽灯、线绕变阻器的模型。电容作为实际电容器的模型。需要考虑实际电容器的损耗时，则用电容和电阻的并联电路作为它的模型。计算电力系统的潮流时，可以用电感作为电力变压器的模型。研究变压器在雷电波作用下急剧变化的电磁过程时，变压器的电路模型可以含有许多个电阻、电感和电容，它们构成极其复杂的电路。

几种电路元件的图形符号

名称	电阻	电感	电容	理想电压源	理想电流源
符号					

电路元件的分类　电路元件可按端子或端口的数目和元件性质进行分类。

按端子或端口的数目分类　按端子数目分类时，电路元件可分作二端元件、三端元件等。按端口数目分类时，电路元件可分作一端口元件、二端口元件、三端口元件等。如电感是二端元件，也是一端口元件。有耦合关系的两个电感一起构成四端元件。

按元件性质分类　按元件性质可分为线性元件和非线性元件，时变元件和非时变元件，有源元件和无源元件，电阻性元件和动态元件等。

(1) 线性元件和非线性元件。元件的电磁特性呈线性关系时，称元件为线性元件，否则称非线性元件。线性电阻的电压、电流关系任何时刻在 u，i 平面上都是过原点的直线（见无源二端元件）。避雷器阀片的电压和电流不成正比，它的模型是非线性电阻，即电阻值随电压变化的电阻。

(2) 非时变元件和时变元件。元件的电磁特性不随时间变化时，称元件为非时变元件，否则称时变元件。电感值不随时间变化的电感是非时变元件。在同样的初始条件下，非时变电感两端的电压与电流的注入时刻无关，若电流是 $i(t)$，电感的端电压是 $u(t)$，当电流延迟一段时间 t_0 注入时，电感的端电压也同样延迟 t_0 时间，即电感的电流是 $i(t-t_0)$，电感的端电压是 $u(t-t_0)$。若电感或两个电感之

间的互感值随时间变化（电机旋转时，定子绕组和转子绕组间的互感随时间变化），则电感是时变元件。

（3）无源元件和有源元件。任意时刻元件吸收的总能量大于或等于零，即任意时刻元件输出的能量不超过此前输入到元件中的电磁能量，这类元件称无源元件；否则称有源元件。电阻值是正值常数的电阻、电感值是正值常数的电感、电容值为正值常数的电容，都是无源元件。独立电源和理想的受控源是有源元件。

（4）电阻性元件和动态元件。若元件的电压、电流之间的关系由代数方程表述，这类元件称电阻性元件。电阻、理想受控源是电阻性元件；若元件的电压、电流之间的关系中，含有对时间的导数，这类元件称动态元件。电感和电容是动态元件。如电感的电压和它的电流与对时间的导数有关。电路中含有动态元件是电路中出现暂态的原因。

dianna

电纳 （susceptance）

见相量法。

dianneng biao

电能表 （watt-hour meter；kWhmeter）

实现有功功率对时间积分即有功电能测量的电表，又称千瓦时表或电度表。电能表应用广泛，可用于累计发电厂发出以及各类用户消耗的电能，作为经济核算和收缴电费的依据。电能表分为单相电能表和三相电能表，还有一些特殊用途的电能表，如多费率电能表、最大需量表、无功电能表、直流电能表、标准电能表等。

感应系单相电能表的原理结构如图 1 所示，实物图见图 2。电压元件 1 和电流元件 2 由相应的线圈和铁芯组成。制动磁铁 3 由永久磁铁和磁轭组成。转动元件 4 由转轴和固定于其上的铝圆盘及蜗杆 6 组成，支承于上下轴承之间。铝圆盘在电压、电流元件间的间隙和制动磁铁的间隙中转动。计度器 5 与蜗杆 6 啮合，将铝圆盘的转动传递至走字轮或指针，在表盘上指示累计测得的电能值（中国更多使用走字轮式计度器，而北美国家较普遍使用指针式计度器）。

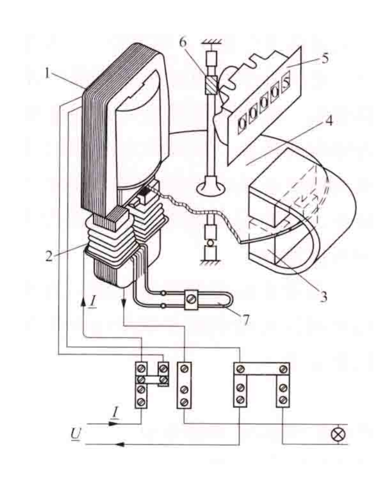


图 1 感应系单相电能表结构图
1—电压元件；2—电流元件；3—制动磁铁；4—转动元件；5—计度器；6—蜗杆；7—相位调整机构

当电能表接入电路后，电压 $\underline{U}$ 加到电压线圈，负载电流 $\underline{I}$ 通过电流线圈。对于感性负载，$\underline{I}$ 滞后于 $\underline{U}$ 的相位角为 φ。由于电压线圈的感抗比电阻大很多，再加上采取一些措施，可使电压工作磁通 $\underline{\Phi}_U$ 滞后于 $\underline{U}$ 的相位角稍大于 90°。电流 $\underline{I}$ 产生的工作磁通 $\underline{\Phi}_I$ 也稍滞后于 $\underline{I}$，利用相位调整机构 7 使 $\underline{\Phi}_U$ 与 $\underline{\Phi}_I$ 之间的相角差 $\beta=90°-\varphi$。交变磁通 $\underline{\Phi}_U$ 和 $\underline{\Phi}_I$ 穿过铝圆盘，分别在铝圆盘内产生感应电动势和相应的涡流 $\underline{I}_U$ 和 $\underline{I}_I$。由于 $\underline{\Phi}_U$ 与 $\underline{I}_I$ 以及 $\underline{\Phi}_I$ 与 $\underline{I}_U$ 在空间位置上不重合，在时间相位上不同，所以它们便产生使铝圆盘旋动的转矩：$M=k\Phi_U\Phi_I\sin(90°-\varphi)=KUI\cos\varphi=KP$（$k$ 与 K 为常数），即转矩 M 与功率 P 成正比关系。铝圆盘转动切割制动磁铁产生的磁通，在一定转速下形成与 M 相等的反作用力矩，使铝圆盘处于动平衡状态。此转速与所测功率成正比，铝圆盘在 t 时间内的转数即代表该时段内的电能。选用适当的传动比，计度器的字轮便指示出电能的千瓦小时数。

将两个或三个单相测量机构装在一起，共用转轴和计数器，即组成三相电能表。

电能表的准确级别，单相表为 2 级，三相表为 2、1、0.5 级。

线路电压改变时，铝圆盘切割 $\underline{\Phi}_U$ 所产生的自制动力矩和轻载补偿力矩的改变将产生误差。当电压改变额定值的 ±10% 时，误差改变应小于准确级指数百分数。

频率变化将引起感应系电能表 $\underline{\Phi}_U$ 和 $\underline{\Phi}_I$ 的幅值与相位角及其自制动力矩改变，以及轻载补偿力矩的改变。当频率变化额定值的 ±5% 时，误差改变应小于准确级指数百分数。当电源为非正弦波时，波形畸变愈大，引起误差愈大。对感应系电能表，要求限定波形畸变系数应小于 5%。

感应系电能表的磁铁及电压线圈和铝圆盘的电阻均有较大的温度系数，温度变化时将引起温度误差。


图 2 电能表

感应系电能表铝圆盘的起动电流应小于 $0.3\%I_b$（I_b 为标定电流，0.5 级）、$0.4\%I_b$（1 级）、$0.5\%I_b$（2 级）。电压在额定值的 80%～110% 之间改变和无电流时，铝圆盘转动不应超过一整转。

在数字电子、计算机等技术推动下，静止式电能表、智能电表发展迅速，已占有很大应用市场份额，感应系电能表将被淘汰。

diannengbiao jiaoyantai

电能表校验台 （calibration equipment of kWhmeter）

用于测定电能表测量误差的成套校验装置。电能表校验台有单相和三相之分（见图 1、图 2），校验方式有手动、半自动和自动。其组成部分包括电源、负载调整、标准电能表、控制器、误差显示和挂表架等。图 3 所示为一般电能表自动校验工作原理框图。电源应具有与被检电能表准确度相适应的稳定度和波形畸变系数，其频率应可调，一般多采用电子稳压电源，需大容量电源时，可采用发电机组。负载调整部分包括相位角、电压及电流的调整，三相线路应保证输出达


图 1 YC-1891G 单相智能电能表检定装置



图 2　YC-1893D（48）三相电能表检定装置

到完全对称。自动校验台的电流和相位角调整应按规定程序自动转换。标准电能表经标准电流互感器接入线路，并将实际电能转换为脉冲，再输入计算和控制器。被检电能表固定于挂表架上，能迅速接入线路中。挂表架上安置有光电元件，能准确取得表示铝圆盘转数的脉冲数，随即送至计算和控制器。计算和控制器可预置校验程序，并按此程序进行控制。从标准电能表和被检电能表输入的脉冲，经计算后在误差显示器上指示出各校验点的误差值，也可由打印机打印输出。图 4 所示为电压电流校准器，图 5 所示为单相多功能校准器。

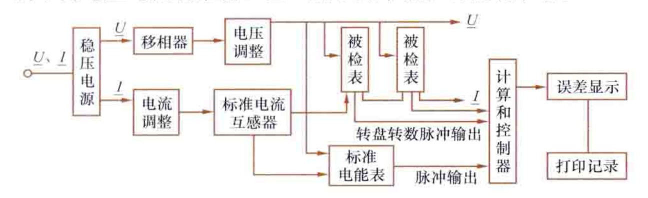


图 3　电能表自动校验台工作原理框图

电能表校验台能完成的检验项目包括：试验前预热、检验电能表常数（走字）、起动、潜动及在规定的不同负载条件下的相对误差，必要时还可进行绝缘电气强度试验。每一次同时检验电能表的数量，根据需要可为 20～200 台。在大量校验工作中可以采用流水线式的自动校验系统。



图 4　SZ-03A-K33E 电压电流校准器

电能表校验台的允许误差，在国际电工委员会推荐标准中有相应规定。使用时，应按国际电工委员会推荐的最新修订的相应标准或中国现行的国家标准执行。



图 5　YC-01B 单相多功能校准器

确定电能表的测量误差通常有两种方法：①瓦特表-秒表法；②标准电能表比较法。

瓦特表-秒表法　当功率 P 恒定时，电能表在时间 t 内测得的电能为 $E=Pt$。采用测量功率和时间的标准仪器，在功率恒定条件下测量时间，即能确定电能表的误差，其值为 $\frac{T-t}{t}\times 100\%$，$T=3600\frac{n}{NP}$。式中 t 为实测时间，s；T 为理论时间，s；P 为输入功率，kW；N 为电能表常数，r/(kW·h)；n 为实测时间内的铝圆盘转数。

此方法较复杂，需要高稳定度电源和熟练的操作人员，但在实验室内仍被广泛采用。

标准电能表比较法　被检电能表和标准电能表同时接入电路中，在时间 t 内比较它们的转数以确定误差，其值为 $\frac{n_b-n_1}{n_1}$，$n_b=\frac{N_b}{N}n$。式中 n_b 和 n_1 分别为被检电能表转 n 转时标准电能表的计算转数和实际转数；N_b 和 N 分别为标准电能表和被检电能表常数，r/(kW·h)。

当标准电能表经电流互感器接入电路时，应引入互感器的变比值。此方法对电源稳定度要求不高，一只标准电能表可同时校验多只电能表，故在大量电能表校验工作中被广泛使用。



图 6　智能电表校验现场

鉴于智能电表所用元器件、所具备功能以及制造工艺的标准化程度已很高，其生产的自动化程度不断提高，对其进行校验的自动化水平也随之不断提高，已有智能电表自动校验系统问世。图 6 所示为智能电表校验现场。

dian'ou jiju

电偶极矩

（electric dipole moment）　表征电偶极子性质的物理量。它的单位是库仑·米（C·m），在分子物理中，常用德拜（D）作为单位，1D＝3.33×10^{-30}C·m。电偶极子是指由等量正负电荷不对称分布而形成电偶极矩的分子。若正负电荷中心的距离为 l，矢径 $\boldsymbol{l}$ 的方向规定为负电荷指向正电荷，则电荷 q 与 $\boldsymbol{l}$ 的乘积定义为电偶极矩。电偶极矩是矢量，用 $\boldsymbol{\mu}$ 表示，即

$$\boldsymbol{\mu}=q\boldsymbol{l}$$

没有外电场时，一个原子中电子云的负电荷中心与原子核的正电荷中心重合，因此原子的电偶极矩为零。在外电场作用下，电子云中心相对原子核发生弹性位移，原子中出现了电偶极矩。由于该偶极矩是在外电场作用下感应产生的，故称为感应偶极矩。而极性电介质的分子在没有外电场时，正负电荷的中心是不相重合的，即分子具有偶极矩，称为固有偶极矩。H_2O 分子的固有偶极矩为 1.85D（6.1×10^{-30}C·m），为强极性分子。

在静止的电偶极子周围，存在着静电场。电偶极子产生的电场以及电偶极子在外电场中所受的力矩作用，都与电偶极矩 $\boldsymbol{\mu}$ 有关。

dianqi jueyuan xingneng

电气绝缘性能

（electrical insulation properties）　电介质将带电导体互相绝缘并且长期地耐受高电场强度作用的特性。电导率和击穿电场强度是表征电介质电气绝缘性能的两个重要参数。

电介质并非理想的绝缘体，在外电场作用下，任何电介质中都有一定的电流通过，这就是电介质的导电现象。一般用电介质的体积电阻率或其倒数体积电导率来描述。电导关系到电介质的漏电和损耗，要提高电介质的绝缘性能，就要求电介质具有高的电阻率，通常绝缘电介质的体积电阻率在 $10^8\Omega\cdot m$ 以上。

与电介质导电现象直接有关的还有电介质的击穿。当外

加电场强度增大到某一临界值时，电介质的电导率突然剧增。在外电场不变的情况下，电介质中的电流迅速增大，电介质便从绝缘状态转变为导电状态，这种现象称为电介质的击穿。击穿后的电介质丧失绝缘性能，所以击穿是电介质在电场作用下保持绝缘性能的极限情况。发生击穿时的临界电场强度称为电介质的击穿电场强度。一般，常压下空气的击穿电场强度为 3×10^6 V/m，液体、固体电介质的击穿电场强度为 $10^7\sim10^9$ V/m。电介质的击穿电场强度在其电气绝缘性能中是很重要的参数，但在实际应用中，材料短期试验得到的击穿电场强度不一定具有大的实用意义，因为电介质的击穿还与其在电气设备中长期应用的条件及电场的分布等有关。

dianqijian

电器件 （electrical component） 根据一定的目的，用导线相连即可组成电路的器件。电器件包括电阻器、电容器、电感线圈、发电机、电动机、变压器、晶体管、晶闸管等等。

电器件可以用图形符号表示，表中为中国国家标准 GB 4728 规定的一些常用图形符号。采用这些符号可绘出表明各电器件相互连接关系的原理性电路图。

部分电工系统图形符号表

名称	符号	名称	符号
导线	——	传声器	
连接的导线		扬声器	
接地		铁芯变压器	
电压表	(V)	电池	
晶体管		开关	
熔断器		电阻器	
照明灯		可变电阻器	
二极管		电容器	
稳压二极管		电感器	
隧道二极管		变压器或互感器	

dianrong

电容 （capacitance） 两导体所带电荷为等量异号时，电荷的量值与导体间电位差的比值。该两导体 a、b 称为电极，其电容 C 为

$$C=\frac{q}{U_{ab}}$$

式中电压 U_{ab} 为导体 a 与 b 间的电位差；q 为导体 a 上的电荷。在许多情况下，两导体间有电介质。电容的大小，既与两个电极的几何形状、尺寸和相互位置有关，又与其间电介质的电容率有关。把两个电极之一的导体 b 移至无穷远处，这时的电容称为孤立导体 a 的电容。它等于孤立导体所带电荷 q 与其电位 φ_a 的比值。此时电位参考点在无穷远处。国际单位制（SI）中，电容的单位是法［拉］(F)。工程上经常使用的电容单位有微法［拉］(μF) 或皮法［拉］(pF)。

电容器　两金属电极，其间常填充有电介质，电场几乎全部集中于两电极之间的电器。电容器是电路中的一个基本元件。电容 C 是表示该电路元件的一个集总参数。理想电容器的两电极之间没有传导电流通过。实际电容器加上电压后只有微弱的传导电流通过，这时可将其看作是一个理想电容 C 和泄漏电阻 R 并联的等效电路。衡量一个实际电容器的性能，有两个主要指标：电容大小和所能承受的电压大小。如外加电压超过电容器的额定电压过多，将使电容器中电介质内电场强度超过其击穿电场强度，导致击穿而损坏。

几种典型结构的电容计算公式　为了计算两电极之间的电容 C，根据 $C=q/U_{ab}$，电极上的电荷 q 可从高斯定理得出 $q=\oint_S \varepsilon\boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{S}$，$S$ 是包围任一电极的闭合曲面，两电极之间的电压 $U_{ab}=\int_a^b \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l}$，只要求出电极间的电场强度 $\boldsymbol{E}$，由上述两个关系式通过积分运算可求出电容 C。

下面是几种典型结构的电容计算公式。这些公式是在忽略电极边缘处电场畸变条件下简化得到的。

（1）平行板电容器的电容

$$C=\frac{\varepsilon S}{d}$$

式中 S 是极板面积；d 是极板的间距；ε 是极板间电介质的电容率。

（2）球形电容器的电容

$$C=\frac{4\pi\varepsilon r_a r_b}{r_b-r_a}$$

式中 r_a、r_b 分别为内、外球的外半径和内半径；ε 是内、外球间电介质的电容率。

（3）圆柱形电容器的电容

$$C=\frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{r_b}{r_a}}$$

式中 r_a、r_b 分别为内圆柱的外半径和外圆柱的内半径；l 是圆柱体的长度；ε 是内、外圆柱间电介质的电容率。

（4）平行双输电线间的电容

$$C=\frac{\pi\varepsilon l}{\ln\left[\frac{h}{2a}+\sqrt{\left(\frac{h}{2a}\right)^2-1}\right]}$$

式中 l 为输电线的长度；h 是输电线轴线间的距离；a 是输电线的半径；ε 是平行双输电线间电介质的电容率。一般情况下，$h\gg a$，可取双输电线的电容 $C=\pi\varepsilon l/\ln(h/a)$。

电容器的串联与并联　在实际应用中，当单独一个电容器的电容量或承受电压不能满足要求时，可把几个电容器连接起来使用。其基本连接方式有串联和并联两种。将每个电容器的一个极板与另一个电容器的极板依次串联连接，则形成串联。n 个电容器串联后的等值电容 C 为

$$C=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}(1/C_i)}$$

这时每个电容器上的电压与其电容量成反比，单个电容器上所承受的电压低于外加电源电压。把各电容器的两个极板全部并联连接，n 个电容器并联的等值电容 $C=\sum_{i=1}^{n}C_i$，总电容增大，每个电容器上的电压相同。

三相制均衡输电线的电容　三相工频正弦电流的电场不

属于静电场问题，但因其频率不高，电场随时间变化率不高，仍然可以利用静电场的基本关系来分析计算其电容。架空输电线路的电容与电极间的距离及离地高度有关。三相输电线路的三根导线不能同时满足具有相同的线间距离和线与地面之间等高的条件，这样，必造成三相线路的各相电容不等。为了尽量做到三相平衡，输电线路的导线要加以换位。措施是经过相同的一定长度后，各相导线依次交换位置，经过换位并考虑到大地的影响，三相输电线每相的等值工作电容C_p为

$$C_p=\frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln\left(\frac{2hd}{ad'}\right)}$$

上述结果适用于输电线距地等高的情况。式中h为导线距地高度；a为输电线半径；三相输电线间的距离分别为d_{AB}、d_{BC}、d_{CA}，$d=\sqrt[3]{d_{AB}d_{BC}d_{CA}}$是线间距离的几何平均值，$d'=\sqrt[3]{d'_{AB}d'_{BC}d'_{CA}}$是各相导线轴与大地中对应的镜像导线轴之间的距离的几何平均值。

部分电容和杂散电容　考虑由$n+1$个导体组成的系统，如各个导体带有不同的电荷，导体具有不同的电位，假设其中一个导体的电位为零（参考电位）和总电荷的代数和为零。这时可用$n(n+1)/2$个电容来表示各导体上电荷与各导体间电位差的关系。这些电容叫导体系统的部分电容。部分电容的大小取决于这些导体的几何形状、大小、相互位置以及导体之间电介质的电容率。通过部分电容使导体间有静电耦合。如三相对称布置带有导体外壳的电缆，共有4个导体，6个部分电容，其中3个为线间电容，3个为线芯对外壳之间的电容。通常人们把导体系统中不是由于工作需要而又实际存在的一部分静电耦合较弱的部分电容，称之为杂散电容。在精密测量或传输微弱信号时，杂散电容的大小易受外界环境影响而改变，使测量精度或仪器工作性能降低，应采用静电屏蔽等措施来削弱或消除其影响。

电容器的能量　电容器的电场能量W_e与电容C有关，即

$$W_e=\frac{1}{2}qU_{ab}=\frac{1}{2}CU_{ab}^2=\frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$$

电容器在相同电压条件下，C愈大，储存的电场能量愈大。电容器是电路中储存电场能量的元件。电力系统中，电力电容器被用来改善功率因数就是利用这一性质。在电子电路中，电容器也是一种常用的电路元件。如调谐用的可变电容器，以及组成整流滤波和时延电路的电容器等。

非线性电容　电容电介质的电容率明显地为电场强度的非线性函数时，这类电容称为非线性电容。它的特性常用电压U与电荷q的关系曲线（q-U特性曲线）表示。在q-U曲线上与某一工作点对应的q与U的比值叫静态电容。特性曲线的斜率dq/dU叫非线性电容的动态电容。这类非线性电容组成的电路元件可以模拟变容二极管和高速开关的运行特性。

dianrong celiang

电容测量

（capacitance measurement）　基本电参数电容的测量。在国际单位制中，电容的单位为法（F）。这个单位非常大，工程中常用电容器的电容量一般约为几皮法（pF）至几千皮法（pF）。由于两电极间电介质有能量损耗，电容器可看作是电容与电阻串联（或并联）。测量电容的方法有冲击法、电容表法、三表法、电桥法和谐振法等。

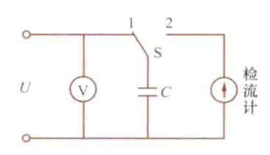


图1　冲击法测电容的原理接线

冲击法　用冲击检流计间接测量电容的方法，其原理接线如图1所示。图中除被测电容外，还接有直流电压表和冲击检流计。对被测电容C施加直流电压U，将开关S由位置1迅速投切至位置2，电容C上的电荷Q通过检流计泄放，并由检流计读出，则电容量C可按公式$C=Q/U$计算。

电容表法　用电容表直接测量电容的方法。电容表使用方便，可直读被测电容量。指针式电容表需外接工频电源，测量范围为0.5～10μF。数字电容表用电池供电，测量范围为几皮法（pF）至数千微法（μF）。

三表法　用交流电压表、电流表、功率表测量电容的方法，其原理接线如图2所示，电阻r与被测电容C串联，反映电容器的能量损耗。电容C可分别由电压表、电流表和功率表测得的U、I、P值以及已知的电源频率值f，按公式$C=\frac{1}{2\pi f\sqrt{(U/I)^2-(P/I^2)^2}}$计算得到。若$P\approx0$，电阻$r$可忽略不计，电容$C$可只由$U$、$I$值按公式$C=I/(2\pi fU)$计算。

电桥法　用交流电桥测量电容的方法。

谐振法　利用电感、电容组成的电路可能发生谐振实现电容测量的方法。具体是将标准可变电感L与待测电容C组成串联或并联电路，调节L，使该电路发生谐振。也可用固定标准电感与待测电容C组成串联或并联电路，由高频信号发生器供电，调节发生器输出信号的频率，使电路出现谐振。电容C可由电感L和电源频率值f，按公式$C=\frac{1}{(2\pi f)^2L}$计算得到。

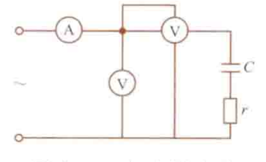


图2　三表法测电容的原理接线

dianrong fenyaqi

电容分压器

（capacitor voltage divider）　见分压器。

dianronglü

电容率

（permittivity）　描述电介质极化性能的宏观参数，也称介电常数。一电容器充满电介质时的电容量C与真空时电容量C_0的比值称为该电介质的相对电容率（也称相对介电常数），用ε_r表示，即

$$\varepsilon_r=\frac{C}{C_0}\tag{1}$$

ε_r是无量纲值且大于1。显然，电介质极化愈强，其相对电容率ε_r就愈大。干燥空气在温度为20℃、气压为1个大气压力下的ε_r为1.000 58，非极性石蜡的ε_r为2.25，而强极性的水的ε_r达80。空气的ε_r接近于1，所以固体与液体电介质的相对电容率可以认为是与空气的电容率的比值。

电介质的电容率与外加电场频率及温度有关。在恒定电场作用下，电容率具有最大值，称为电介质的静态电容率ε_s，在光频下的电容率称为光学电容率ε_∞。对于非极性电介质，其ε_s与ε_∞相等。对于极性电介质和一些离子晶体介质，

其ε_s和ε_∞可能相差较大。

电介质的相对电容率ε_r与电介质组成的三个微观参数N、α、E_i的关系为

$$\varepsilon_s - 1 = \frac{N\alpha E_i}{\varepsilon_0 E} \quad (2)$$

式中ε_0是真空的绝对电容率，$\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-12}$ F/m；E是外加宏观电场强度；N是电介质单位体积的分子数；α是电介质的分子极化率；E_i是电介质中的有效电场强度，是指作用在极化分子上的电场强度。一般，E_i和E是不相等的，E_i与电介质的微观结构有关。

电容率的温度系数α_ε定义为温度变化1℃时，电容率的相对变化率，即

$$\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dT} \quad (3)$$

式中α_ε的单位是℃$^{-1}$。

dianronglü yu sunhao yinshu shiyan

电容率与损耗因数试验 (test for permittivity and dissipation factor) 一种测定电介质或电气设备绝缘系统的电容率与交流有功损耗功率特性的试验。作为电介质基本电气性能参数之一的电容率ε，是经常需要测定的。在交流电压作用下，绝缘材料会因漏电导、松弛极化，甚至局部放电等原因导致部分电能在电介质中被转化为热能而消耗掉，这将使流过绝缘电流的相位由超前电压$\pi/2$ rad减小为$(\pi/2-\delta)$rad，δ称为介质损耗角。$\tan\delta$称为损耗因数，又称介质损耗角正切，它反映了电介质的有功损耗，为电介质损耗中有功功率与无功功率的比值。实测$\tan\delta$可作为选择材料、控制工艺和判断设备绝缘性能的一种依据。同时亦可根据$\tan\delta$来判断设备绝缘性能的有效性。

测量原理 电容率可根据一定电极系统下试样的电容C_x求取，即

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} = \frac{0.036\pi t C_x}{A} \quad (1)$$

式中ε_r为相对电容率；C_0为试样的几何电容，pF；C_x为试样电容，pF；t为试样厚度，m；A为电极面积，m^2。

损耗因数可根据串联等值电路［图1(a)］或并联等值电路［图1(b)］，通过测量C_s、r_s或C_p、R_p按式(2)或式(3)求得。

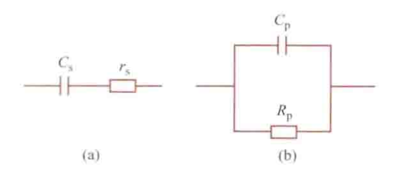


图1 反映电介质损耗的等值电路
(a) 串联等值电路；(b) 并联等值电路

采用串联等值电路时

$$\tan\delta = \omega C_s r_s \quad (2)$$

采用并联等值电路时

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3)$$

式中ω为所加电压的角频率。

测量方法 有电桥法、谐振法、损耗角直测法等。

电桥法 常用的是平衡电桥，有西林电桥、变压器电桥、四电容电桥等。

(1) 用西林电桥进行测量，1920年由德国H.西林(H. Schering)提出。它适于在低频高压交流电压下进行测量。高压西林电桥的原理接线如图2(a)所示。

在电桥平衡时可得

$$C_x = \frac{R_4}{R_3}C_N；\tan\delta = \omega C_4 R_4 \quad (4)$$

根据试品接地与否的情况，电桥的连接方法有正接法、反接法和对角线接法。对不直接接地的试品采用正接法，即接线图2中D点接地。对现场运行中必须接地的试品，可采用反接法，即接线图中C点接地，或可采用A点接地的对角线接法。采用反接法时，可调电容和电阻处于高电位，需采取相应的安全措施。采用对角线接法时，应设法排除试验电源及引线等的对地电容及损耗所引起的试验误差。

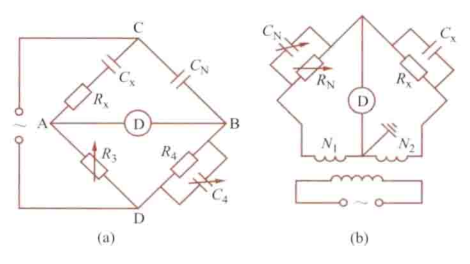


图2 两种电桥法的测量线路
(a) 高压西林电桥；(b) 低压变压器电桥
C_x、R_x—试品等值电容和电阻；C_N、R_N—标准电容和电阻；R_3、R_4—桥臂电阻；C_4—可调电容；N_1、N_2—绕组匝数；D—平衡指示器

外界电磁场的干扰会引起测量误差，有时电桥甚至不能平衡。消除或减小干扰影响的方法：在实验室中可以采用屏蔽、接地以及改变测试回路和仪器的位置等。在现场测量时可变动试验电压的相位进行两次测量，即先调节电桥平衡测得$\tan\delta'$及C'_x，然后将试验电压的相位变动180°，再测得$\tan\delta''$及C''_x。绝缘实际的$\tan\delta = (C'_x\tan\delta' + C''_x\tan\delta'')/(C'_x + C''_x)$。减弱外界磁场干扰影响的做法是，将检测器D与电桥结点A、B的连接倒换一下，分别测得两种情况下的数值$\tan\delta'$和$\tan\delta''$。绝缘实际的$\tan\delta = (\tan\delta' + \tan\delta'')/2$。

西林电桥可在施加高电压下，实测量出有关参数值，对高压电气设备绝缘的检测，较符合运行状态下的实际情况。

(2) 用低压变压器电桥进行测量。如图2(b)接线所示。当电桥平衡时可得

$$C_x = \frac{N_1}{N_2}C_N；\tan\delta = \frac{1}{\omega C_N R_N} \quad (5)$$

这种电桥的灵敏度和准确度较高。一般用作精密的、量程范围较大的校正测量。

(3) 用四电容电桥进行测量。该电桥的诸桥臂主要由电容构成，可较准确地测试$\tan\delta$较小的绝缘材料。

谐振法 在高频电压下进行测量的一种方法。试样电容用替代法测量；损耗因数常用变Q值法和变电纳法测量。

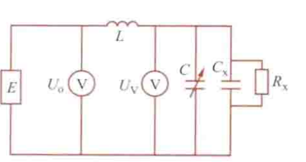


图3 谐振法测量线路
C_x、R_x—试样并联时的电容与电阻；L—谐振线圈；C—谐振电容；V—高频电压表；E—高频电源

(1) 电容C_x的测量。如图3所示，在有试样和无试样两种情况下，由发生谐振时调谐电容C的差值ΔC来求取C_x，即$C_x = \Delta C = C_2 - C_1$。式中$C_2$、$C_1$分别为无试样与有试样谐振时，调谐电容的读数。

（2）损耗因数 $\tan\delta$ 的测量。①用变 Q 值法。设 Q_1 和 Q_2 分别为有试样及无试样下电路发生谐振时的 Q 值，则

$$\tan\delta=\frac{C_2+C_0}{C_x}\left(\frac{1}{Q_1}-\frac{1}{Q_2}\right) \tag{6}$$

式中 C_2 为无试样时的谐振电容；C_0 为谐振电容以外的零电容。②用变电纳法。测量有试样及无试样两种情况下失谐到半功率点时谐振曲线的宽度 ΔC_1 和 ΔC_2，则 $\tan\delta=\dfrac{\Delta C_1-\Delta C_2}{2C_x}$，式中 C_2 为无试样时的谐振电容。

损耗角直测法　基本原理是将流过试品的电流信号与由高压标准电容器或其他采样元件所取得的试品两端的电压信号用相位比较器进行比较，利用脉冲计数法测出两者的相位差 φ，然后根据 $\varphi=\pi/2-\delta$ 算出试品的介质损耗角 δ，进而得到 $\tan\delta$。由于测试中避免了调节电桥平衡的复杂过程，因而在电气设备在线连续监测中十分有利，但准确度稍差。

绝缘材料试样与电极

（1）试样：根据材料类型有平板、薄膜、管状三种。

（2）电极系统：有二电极系统与三电极系统。三电极系统用于低频电桥法。二电极系统用于高频谐振法。

（3）电极型式：有接触式与不接触式两种。一般采用接触式电极。不接触电极用于薄膜和30MHz以上的高频测量。

（4）电极材料：用接触法测量时，必须在被测材料表面贴涂电极。在低频下可用粘贴铝箔、烧银、真空蒸铝或金、导电橡皮等。在高频下只能采用前两者。用不接触电极时，材料表面不需贴涂电极。

测试技术

（1）测量方法与仪器的选择：按材料的性能、测量频率与所需的测量准确度选择。

（2）边缘电容的校正：应用三电极时，用等效面积（板状试样）或等效长度（管状试样）计算相对电容率。应用二电极时，用经验公式修正边缘效应，如测微电极，此时不需作边缘电容的校正。

（3）温度、湿度影响的消除：测试前作试样的预处理。测试在标准条件下进行。

（4）电场干扰的消除：对连线、检测器和试品采用完善的屏蔽，接地点应选择合适，接地应良好。

dianrong lübo zhengliu dianlu

电容滤波整流电路　(rectifier circuit with C filter)

用电容滤去单向脉动直流电压中的脉动分量，以输出平滑直流电压的整流电路。纯电阻负载整流电路输出的是单向脉动直流电压，在实际应用时必须加接滤波电路，滤去输出电流中的脉动分量，使输出尽量平滑。滤波电路按所采用的电抗元件可分为电感、电容滤波电路和 π 型滤波电路。电感型滤波多用于大功率三相整流装置中。单相整流电路中常用电容型滤波和 π 型滤波电路。

电容型滤波整流电路　电容型滤波整流电路如图1所示。由图可见，它是在负载电阻 R_L 两端并联一个电容量足够大的电容 C 构成。由于电容器是储能元件，它能使整流电路输出波形变得比较平滑。图1中实线所示的电压波形为加上滤波电容 C 时，负载 R_L 两端的电压波形。虚线部分为未加滤波电容 C 时，R_L 两端的电压波形。当 u_2 高于 u_L 时，整流二极管导通，电容 C 处于充电状态。而当 u_2 低于 u_L 时，二极管截止，电容 C 通过负载 R_L 放电，把能量释放给负载。如此周而复始，在负载 R_L 上即可获得平滑的直流电压。

采用电容滤波后，二极管导通角减小，其输出电压将增高。在半波整流电路中，当 $R_LC\geqslant(3\sim5)T$（T 是交流电压的周期）时，或者在全波整流电路中，当 $R_LC\geqslant(3\sim5)T/2$ 时，输出直流电压为 $U_L=(1\sim1.4)U_2$。R_LC 值越大，U_L 值越高，而且其脉动系数（见整流电路）值也越小。当负载电阻 $R_L\rightarrow\infty$ 时，$U_L=\sqrt{2}U_2$，脉动系数 $M\rightarrow0$。

图1(a)所示电路中整流二极管所承受的反向电压最大值比无电容时大，其值等于 $\sqrt{2}U_2+U_L$。图1(b)、(c)所示电路中加滤波电容器和不加滤波电容器时二极管所承受的最大反向电压值都相等。

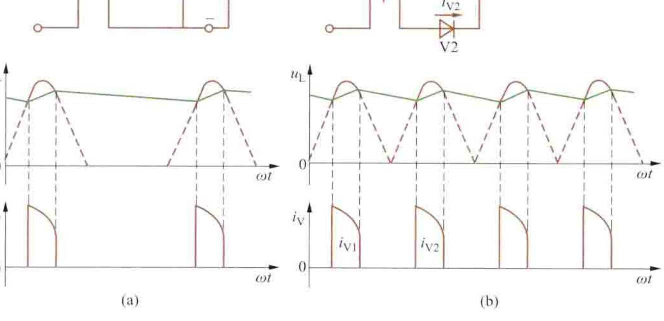
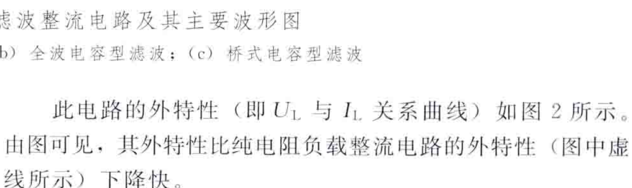



图1　电容型滤波整流电路及其主要波形图

(a) 半波电容型滤波；(b) 全波电容型滤波；(c) 桥式电容型滤波

此电路的外特性（即 U_L 与 I_L 关系曲线）如图2所示。由图可见，其外特性比纯电阻负载整流电路的外特性（图中虚线所示）下降快。

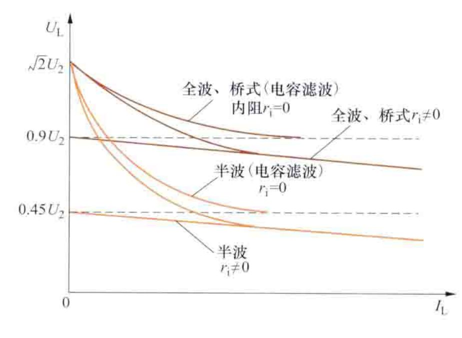


图2　电容型滤波整流电路的外特性

π 型滤波电路　电容型滤波电路在一定的负载 R_L 下，加大滤波电容容量，通常可使脉动系数 M 达到 10^{-2} 数量级。若要使其 M 更小，需在滤波电容后面再加一个或几个 $R-C$ 滤波器来组成 π 型滤波电路。在 C_1 和 R_L 之间加入一个

R－C滤波器组成的π型滤波电路，如图3所示。此时R_L两端直流电压值为$U_L=R_LU_{C1}/(R_L+R)$。

π型滤波电路输出端脉动系数M_2和输入端脉动系数M_1之间的关系为$M_2=M_1/\omega C_2R'$。式中ω为整流输出脉动电压的基波角频率，当电网频率为50Hz时，半波整流角频率$\omega=314$rad/s，全波整流角频率$\omega=628$rad/s；$R'=R/\!/R_L$，//表示电阻并联。

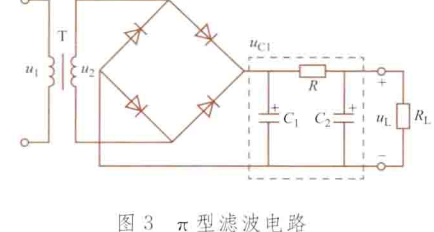


图3　π型滤波电路

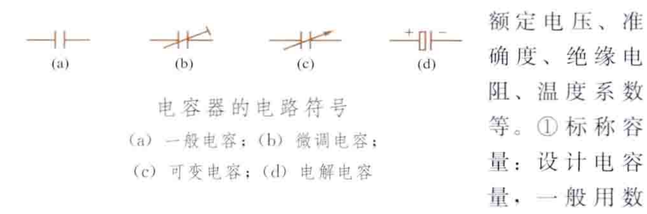
dianrongqi

电容器

（capacitor）　允许交流电流通过，而不允许直流电流通过的一种可容纳电荷的二端电路元件。它在直流下能储存电荷，在正弦电压下能通过超前电压相位近90°的电容性电流，具有隔断直流、耦合交流信号的作用。电容器由两个金属电极之间夹电介质层构成，简称电容，用字母“C”表示，基本单位是法拉（F）。电容量（C）与金属电极板面积（S）、极间距离（d）和电介质的电容率ε有关，在普通平板型电容器中电容量可用$C=\varepsilon S/d$公式来计算。

分类　电容器种类繁多：①按电介质材料分为：有机电介质（复合介质、纸介质、塑料介质、薄膜复合）、无机电介质（云母、玻璃釉、陶瓷）、气体电介质（空气、真空、充气）、电解质（普通铝电解、钽电解、铌电解）；②按容量是否可调分为：固定电容器、可变电容器（空气介质、塑膜介质）、微调电容器（陶瓷介质、空气介质、塑膜介质）；③按应用领域分为：电力电容器、高压脉冲电容器、电子电路用电容器等。电子电路用电容器在电子电路中起滤波、隔直、耦合、旁路、调谐等作用，是电子电路中不可缺少的基本元件。电容器的电路符号如图所示。

主要参数　表征电容器特性的主要参数有标称容量、额定电压、准确度、绝缘电阻、温度系数等。①标称容量：设计电容量，一般用数字或色环标注在电容器的外壳上。②额定电压：在规定条件下，电容器在电路中连续长时间工作而不被击穿的最大直流电压，它与电容器的结构、电介质以及介质厚度有关。③准确度：电容实际值与其标称容量间允许的相对误差范围，一般分为3级：Ⅰ级±5%，Ⅱ级±10%，Ⅲ级±20%。④绝缘电阻：由所用的电介质及其厚度决定，它反映了电容器漏电的大小。⑤温度系数：在一定范围内，温度每变化1℃，电容量的相对变化值。影响电容器温度系数的主要因素是电介质材料的温度特性及其结构。



电容器的电路符号
(a) 一般电容；(b) 微调电容；
(c) 可变电容；(d) 电解电容

dianrongxing jueyuan de zaixian zhenduan

电容型绝缘的在线诊断

（on-line insulation diagnosis of capacitive type equipment）　对运行状态下的电容型设备绝缘进行试验和各种特性测量，分析其特征，并对绝缘状态作出判断的技术。电力电容器、电容型套管、电容型电流互感器以及电容式电压互感器（组成部件包括电容器）统称为电容型设备。推行和发展电容型绝缘诊断技术，能在早期发现故障，提高电容型设备的运行可靠性。电容型绝缘在线诊断的项目有：①介质损耗因数tanδ；②流经绝缘电流值的变化ΔI/I；③绝缘电容量的变化ΔC/C。

介质损耗因数tanδ　在线监测介质损耗因数，是先测量流经绝缘电流i超前绝缘两端电压u的相位φ，再按公式计算介质损耗角$\delta=(\pi/2)-\varphi$。介质损耗角有两种监测方法：过零点时差法和正弦波参数法。

过零点时差法　在时域中，通过脉冲计数来测量正弦电流、电压由负变正过零点的时差ΔT，换算为φ，再算得δ的一种方法。用时差信号ΔT来控制脉冲计数器对重复周期为τ的时基脉冲的计数，若计得的脉冲数为n，则$\Delta T\approx n\tau$。在测得ΔT后，易知$\varphi=2\pi(\Delta T/T)$，而$\delta=(\pi/2)-2\pi(\Delta T/T)$，其中T为正弦波的周期。为使装置具有必需的分辨率，时基脉冲的重复周期τ应足够短。

正弦波参数法　通过模/数转换，将正弦电流、电压信号离散化，应用相应算法，求得正弦波参数I_m、φ_i、U_m、φ_u，计算出φ，再算得δ的一种方法。如，可根据三角函数的正交性，根据以采样率f_s采得的M对采样值$i(t_j)$、$u(t_j)$，$j=0,\cdots,(M-1)$及工频电压的频率f，进行数值积分来求出φ。

流经绝缘电流值的变化ΔI/I　监测流经绝缘的电流的变化对发现绝缘缺陷更为灵敏。通常同时监测三相设备，正常时流经监测装置的电流为零。若某相绝缘出现缺陷，流经该相绝缘的电流发生变化，引起三相不平衡电流，监测装置能很灵敏地发现此电流。对三相不平衡电流的监测，可能引起测量误差的因素有：电网谐波、工频电场干扰、电容型设备外绝缘的泄漏电流、三相电压不平衡状态的变化、监测装置的不稳定性等。三次谐波影响严重，监测装置应设有针对150Hz的带阻滤波器。

绝缘电容量的变化ΔC/C　在对流经绝缘的电流$i(t)$和绝缘两端电压$u(t)$采样后，分别求得电流、电压的有效值I、U，监测装置同时测量工频电压的频率f，设备的电容量可由公式$C=I\cos\delta/(2\pi fU)$计算求得。

diantong midu

电通密度

（electric flux density）　用以描述电场的辅助物理量，用符号**D**表示，它的定义式是

$$\boldsymbol{D}=\varepsilon_0\boldsymbol{E}+\boldsymbol{P}$$

式中**E**是电场强度；**P**是极化强度；ε_0是真空电容率。在线性电介质中，上式成为

$$\boldsymbol{D}=\varepsilon\boldsymbol{E}$$

式中ε为电介质的电容率。

极化强度和电容率　电介质中每个分子都是一个复杂的带电系统，含有等电荷量的正、负束缚电荷，并分布在线度10^{-10} m的区域内。在正常情况下，电介质中的分子对外不呈现带电性。但在外电场作用下，正、负电荷位置不重合，相距一微小距离l，形成电偶极子，有电偶极矩**p**，$\boldsymbol{p}=q\boldsymbol{l}$，式中q为电荷，**l**的方向由负电荷指向正电荷；正、负电荷位置不重合的电荷在外电场作用下呈现有序定向排列。当电

介质处于外电场中，在其内部将呈现出大量的电偶极子，这个宏观效应叫电介质极化，并用极化强度 $\boldsymbol{P}$ 来度量。$\boldsymbol{P} = \lim\limits_{\Delta V \to 0} \frac{\sum \boldsymbol{p}_i}{\Delta V}$，$\Delta V$ 是物理体积元，其中包含有大量的微观分子电偶极矩 $\sum \boldsymbol{p}_i$。在电介质中，$\boldsymbol{P}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 之间存在一定关系。大多数电介质的 $\boldsymbol{P}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 在各个方向上均有相同的关系，这类电介质叫各向同性电介质。但有些电介质的 $\boldsymbol{P}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 之间随 $\boldsymbol{E}$ 的方向不同而有不同的关系，这类电介质称为各向异性电介质。有一类电介质的 $\boldsymbol{P}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 有线性关系，称为线性电介质。对于线性各向同性均匀电介质，$\boldsymbol{P} = \varepsilon_0 \chi \boldsymbol{E}$，$\chi$ 为电介质的极化率，它是常量。另一类电介质的 $\boldsymbol{P}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 有非线性关系，称为非线性电介质。通过计算电偶极子的电场，可以得出电介质内部成立

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}) = \rho$$

式中 ρ 为自由电荷体密度，定义电通密度 $\boldsymbol{D}$ 为

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$$

$\boldsymbol{D}$ 和 $\boldsymbol{P}$ 的单位均为库仑每平方米（$\mathrm{C/m^2}$）。对于线性电介质，因为 $\boldsymbol{P} = \varepsilon_0 \chi \boldsymbol{E}$，上式又可写成

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi_r) \boldsymbol{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \boldsymbol{E} = \varepsilon \boldsymbol{E}$$

式中 ε_r 为电介质的相对电容率。ε 表示电介质在电场作用下、考虑极化性能后的参数。电介质如为线性各向同性的，ε 为常量。电容率可通过实验测出。

高斯通量定理　在微分形式的方程 $\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho$ 两边对电介质中任意区域 Ω 进行积分，并应用矢量分析中的散度定理，得

$$\oint_S \boldsymbol{D} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \int_\Omega \rho \mathrm{d}V$$

上式为高斯通量定理的积分表达式。它是静电场的基本定理之一。这个定理虽然是从静电场的库仑定律出发推导而得，但其适用范围可推广到时变电场。

高斯通量定理积分表达式的左侧，是电通密度 $\boldsymbol{D}$ 对任一闭合曲面 S（区域 Ω 的表面）的面积分，它表示通过该曲面 S 的 $\boldsymbol{D}$ 的通量，故 $\boldsymbol{D}$ 称为电通密度。根据高斯通量定理，这个通量应等于该闭合曲面 S 所围区域 Ω 内所包含的自由电荷的代数和。高斯通量定理揭示了电场的场源 ρ 与场量 $\boldsymbol{D}$ 之间的基本关系。计算具有对称分布或均匀分布的电场的 $\boldsymbol{D}$ 或 $\boldsymbol{E}$，是高斯通量定理的一个应用。

dianwei

电位

（electric potential）　表示静电场电场强度的标量位，其值等于从观察点沿任一路径移动单位正电荷到参考点时电场力所做的功。单位正电荷受到的电场力等于电场强度 $\boldsymbol{E}$，因此，电场中任一点 a 的电位 φ_a 是

$$\varphi_a = \int_a^p \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

式中 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 是积分路径上的长度元；点 p 是电位参考点。已知电位分布，$\boldsymbol{E}$ 按下式计算

$$\boldsymbol{E} = -\nabla\varphi$$

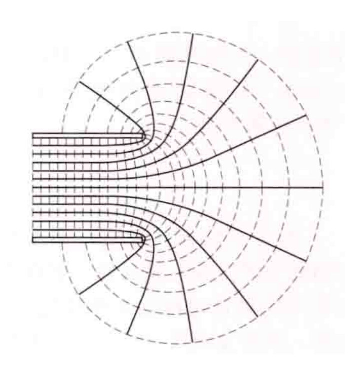
电位的单位是伏特（V）。电位是一个标量函数，当参考点选定后，φ_a 只与点 a 的位置有关。如参考点选择不同，则两种情况下的 φ_a 值相差一个常量。工程实际中常选取大地为参考点。静电场中，a、b 两点间的电位差为

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \int_a^b \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

电位差与参考点的选择无关。

电位与电荷的关系　在点电荷 q 所激发的电场中，如周围是真空，且选无穷远处为参考点，则与点电荷（场源）相距 r 处一点的电位 $\varphi = q/(4\pi\varepsilon_0 r)$。式中 ε_0 为真空电容率。也可求出其他各种电荷分布情况下的电位。由 $\boldsymbol{E} = -\nabla\varphi$，可进一步算出电场强度 $\boldsymbol{E}$。

等位面　电位相等的点所组成的曲面叫等位面。导体是等位体，因此导体表面是等位面。一个点电荷周围的等位面均为球面。不同的电场可有不同形状的等位面。与等位面相垂直的曲线是电场线。如能使相邻两等位面间的电位差均相等，则可估计出电场的分布情况。等位面愈密处，电场强度愈大，如图所示。



平行板电容器端部的等位面（实线）和电场线（虚线）

电位满足的基本方程　对于线性各向同性均匀的电介质，其电容率 ε 为常量，电位 φ 满足的基本方程为泊松方程

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

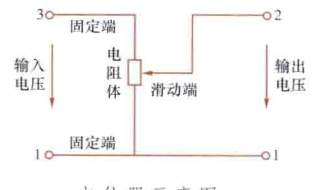
式中 ρ 是自由电荷体密度。当所研究的静电场空间没有自由电荷分布时，电位 φ 满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

dianweiqi

电位器

（potentiometer）　具有三个端子的可变电阻器。电位器通常由电阻体和可移动的触点（滑动端）组成（见图），移动接触点的位置可改变可移动触点与电阻体固定端的电阻值，从而改变输出电压和输入电压之间的比值。由图可见，输出电压可以从零调节到输入电压值。电位器可用来调节和控制电位差，例如用来控制电机的磁场电流、调节收音机的音量等。



电位器示意图

主要参数　除了标称总电阻值、额定功率和电阻温度系数（见电阻器）外，还有：①输出函数特性。电位器的电压比（输出电压与输入电压之比）与行程比（滑动端所经行程与总行程之比）间的函数关系，又称阻值变化规律。常用的输出函数特性有直线式、指数式和对数式。此外，还有适用于特殊用途的正弦、余弦等形式。②符合性。电位器的实际输出函数特性与理论值之间的偏差程度，用实际输出与理论输出间的绝对差值的百分比来表示。对直线式电位器来说，符合性用直线性表示，其允许偏差范围称为线性精度。③分辨力。指输出电压或阻值的最精细调节能力，表征触点的最小移动所产生的输出量变化。它对仪器或控制系统的调节精度有重要影响。④滑动噪声。在外加电压的作用下，电位器的动触点在电阻体上滑动时，产生的电噪声。

分类和特点　按电阻体的构成材料分类有线绕电位器、合成碳膜电位器、有机实芯电位器、金属玻璃釉电位器和导电塑料电位器等。①线绕电位器：具有精度高、稳定性好、温度系数小、接触可靠、耐高温、功率负荷能力强等优点；缺点是阻值范围不够大，高频性能差，分辨力不高，体积大，易损坏和价格高。②合成碳膜电位器：具有阻值范围宽、分辨力较好、工艺简单、价格低等优点；但动噪声大，耐潮性差。③有机实芯电位器：阻值范围较宽，分辨力高，耐热性好，过载能力强，但耐潮性和动噪声较差，一般制成半固定形式，在电路中作微调用。④金属玻璃釉电位器：具有有机实芯电位器的优点，且电阻温度系数较小，发展很快。⑤导电塑料电位器：阻值范围宽，线性精度高，分辨力强，耐磨，寿命特别长；缺点是温度系数和接触电阻较大；在控制仪表中得到广泛应用。

dianxue he cixueliang danweizhi

电学和磁学量单位制

(unit system of electric and magnetic quantities)　物理量单位制中电学量和磁学量单位的集合。

基本单位　为了建立一种物理量单位制，首先要选取若干个彼此独立的物理量，把这些量的单位作为基本单位，然后利用物理学方程从基本单位导出其他各种物理量的单位，即导出单位。基本单位和导出单位一起构成了一种物理量单位制。

对于一种单位制来说，基本单位的数目应该足够，以保证能从这些基本单位得到所有的导出单位。另一方面，基本单位的数目应减少到最低限度，以保证单位制内部的一致性。

选择何种物理量单位作为基本单位，由两方面的因素决定：①所选的物理量应是在物理学中起最基本作用的量；②所选物理量的单位应能准确地复现，并便于保存。不同单位制的差别就在于基本单位的选取方法不同。

一般来说，力学量的基本单位是最重要的。通常选取长度、时间和质量（或力）三者的单位作为力学量基本单位，由此就可以导出所有的力学量导出单位。如按照加速度的定义式 $a = d^2s/dt^2$，就可以由路程（即长度）s 和时间 t 的单位导出加速度单位。当涉及电磁量时，由于电磁现象不同于力学现象，还需增加一个电磁量基本单位。

在历史上起过重要作用的和现行的电磁单位制主要有：CGS静电制、CGS电磁制、高斯制、实用单位制及国际单位制等。

CGS静电制　简称为CGSE制。该制所选的长度单位为厘米，质量单位为克，时间单位为秒。选作电磁量基本单位的是电荷量单位，其量值由真空中的静电库仑定律导出(真空电容率规定为1)，称为CGSE电荷单位，CGS静电制便于进行静电学计算，在静电学的发展中起过较大作用。其缺点是此单位制中的许多导出单位的量值太大或太小，不便使用。在进行磁学计算时采用此单位制也不够方便。

CGS电磁制　简称为CGSM制。该制的力学量单位与CGSE制相同，选作电磁量基本单位的是电流单位，其量值由真空中电流元之间的安培力定律来确定，称为CGSM电流单位。这种单位制的优点是便于进行磁学计算，但不少导出单位的量值也是太小或太大，而且不便于进行静电学计算。

高斯制　其中电学量的单位与CGSE制相同，磁学量的单位则与CGSM制相同。因此，高斯制对于静电学计算和磁学计算均可适用，其中大部分导出单位的量值也较适中。高斯制在物理学中曾得到较广泛的应用，其缺点是在联系电学量和磁学量的公式中会出现含有光速 c 的比例系数，使公式复杂化。

实用单位制　简称为MKSA制。在工程计算中得到广泛使用。其中长度单位选用米，质量单位为千克，时间单位为秒。选作电磁量基本单位的为电流单位安培。其他电磁量单位则均可由它们导出，如电荷单位库仑等于安培·秒等。实用单位制中绝大部分单位的大小适中，便于应用，其缺点是规定了真空的电容率和磁导率均为不等于1的常量，因而使一些计算公式较为复杂。

国际单位制　由于实用单位制具有许多优点，1954年的第十届国际计量大会决定以实用单位制的四个基本单位作为基础，再增添热力学温度单位开尔文和发光强度单位坎德拉两个基本单位，发展成为更广泛的国际单位制，简称SI制。国际单位制于1960年第十一届国际计量大会上正式通过。在1971年的第十四届国际计量大会上又决定再增添物质的量的单位摩尔作为第七个基本单位。以后的各届计量大会对国际单位制又有所修改，使其进一步完善。

国际单位制的基本单位中，电流的单位是安培，它的定义如下："安培（A）是电流的单位。在真空中，截面积可忽略的两根相距1米（m）的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} 牛顿（N），则每根导线中的电流定义为1安培（A）"。实际上，这样的定义与规定真空磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m 等效。

国际单位制现已被世界各国广泛接受。中国国务院于1981年批准在中国推广应用国际单位制。

dianya

电压

(voltage)　电场强度 $\boldsymbol{E}$ 沿连接两点的一条规定路径的线积分。由点a沿规定路径 l 至点b间的电压 U_{alb} 是

$$U_{alb}=\int_{alb}\boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l}$$

在国际单位制（SI）中，电压的单位是伏［特］(V)。

静电场中的电压　静电场中电压 U_{ab} 与路径 l 无关，只与点a和点b的位置有关，它等于这两点的电位差 U_{ab}（见电位）。

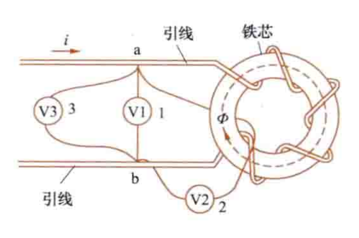
时变电磁场中的电压　一般而言，时变场中电压与路径有关。因此，必须标明积分路径 l，举例说明如下：图示一线圈绕在铁芯上形成电感元件，其中有正弦电流 i。三个电压表V1、V2、V3分别测量电压 U_{a1b}、U_{a2b}、U_{a3b} 的有效值。这里脚注a1b、a2b、a3b分别表示积分路径。由电磁感应定律（见电磁感应）知

$$U_{a2b}-U_{a1b}=\frac{d\Phi}{dt}$$

式中 Φ 是穿过回路a2b1a的磁通量。因上式右端不等于零，所以

$$U_{a2b}\neq U_{a1b}$$

但是如果忽略两引线间空气中的磁场，认为磁通集中在铁芯中，而且积分路径不许穿入电感元件内部，则回路a1b3a的磁通量可以忽略，有 $U_{a1b}\approx U_{a3b}$。在这种通常不予说明的约定下，两



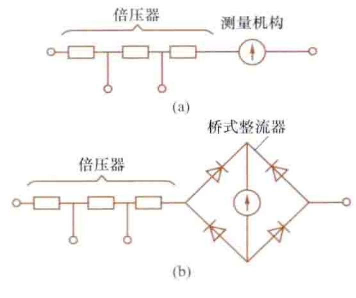
时变电磁场中电压与路径有关

点间的交流电压近似与路径无关，而图中电压表 V1、V3 的读数近似相等。

dianya biao

电压表 (voltmeter) 测量直流、交流电压量值的电表。可分为直流电压表和交流电压表两大类。

直流电压表 主要采用磁电系或电动系测量机构（见机械式指示电表测量机构），并串联由适当电阻构成的倍压器而形成（见图）。对不同电压量程，可串联不同电阻值的倍压器。静电系测量机构量测的基本量是电压，可直接用于测量直流电压。改变电极间的间隔或采用不同结构，可形成量程不同的静电系电压表。利用数字电子技术，可制成直流数字电压表。



直流电压表与交流电压表

(a) 直流电压表；(b) 交流电压表

交流电压表 除可使用静电系测量机构外，用电磁系、电动系测量机构串以倍压器，均可形成交流电压表。至于磁电系测量机构，可结合整流器或热电偶，制成能测量交流电流的电流表，再配以适当阻值的倍压器，便可形成交流电压表，分别称为整流式电压表和热电式交流电压表。利用数字电子技术可制成交流数字电压表。

各种电压表的量限、使用频率范围、内阻及可能达到的最高准确级见表。

电压表的量限、使用频率范围、内阻及最高准确级

电表种类		量程（V） 10^{-4} 10^{-2} 10^{0} 10^{2} 10^{4}	使用频率范围（10^{n}Hz） 直流 n= 1 2 3 4 5 6	内阻（$10^{n}\Omega$/V） n= 1 2 3 4 5	最高准确级
模拟	磁电系		·		0.05
	电磁系	*	·		0.1
	电动系	*	·		0.05
	静电系		·	很高	0.5
	整流式				0.5
	热电式		·		0.5
	晶体管式			兆欧级	0.5
数字	直流		·	兆欧级	0.005
	交流			几百千欧	0.02

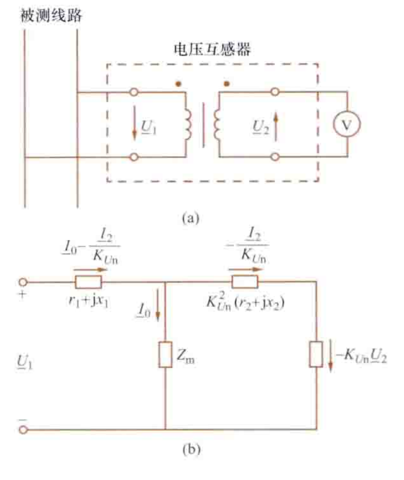
* 测高电压时须配合电压互感器使用。

整流式和晶体管式电压表一般规定使用在正弦交流电路中，如被测电压波形是非正弦的，需采用变换器式电压表。

dianya huganqi

电压互感器 (voltage transformer) 将待测交流电压按额定比值进行量值变换的仪器。

电压互感器有测量用与保护用之分。测量用电压互感器的主要功能及特点是在被测系统正常运行时：①扩展电表量限，测量电压，提供给其他测量电表，以计量电能的产生或消耗，监测、记录被测系统的运行状态；②将不同额定值的高电压变换为统一的低压额定值，以利于所接测量电表的标准化；③使测量电表与被测系统的高电位隔离，以保证安全。此外，精密的测量用电压互感器可作标准仪器，用以检定准确级别至少低两级的测量用电压互感器，或与标准表配合，扩展其量限，检定相应测量电表。保护用电压互感器则主要在被测系统非正常运行和故障状态下，将被测电压变换后，提供给继电保护装置，以启动相关设备清除故障，并对故障进行监视和记录。



电磁式电压互感器的原理线路和等值电路

(a) 原理线路；(b) 等值电路

电压互感器主要是电磁式电压互感器和电容式电压互感器，可直接输出数字量信号的电子式电压互感器已得到应用。

电磁式电压互感器 利用铁芯上两绕组间的电磁感应作用，实现交流电压量值变换的仪器。

图 (a)、(b) 分别是电磁式电压互感器的原理线路和等值电路。其误差主要由两部分组成：一项是励磁电流 I_0 流过一次绕组漏阻抗 (r_1+jx_1) 引起的空载比差 (f_0) 和角差 (δ_0)；另一项是负载电流 I_2（折算后）流过一次绕组漏阻抗 (r_1+jx_1) 和二次绕组漏阻抗 (r_2+jx_2) 引起的负载误差 (f_B、δ_B)。总比值差 f 和相角差 δ 的表达式分别为：$f=f_0+f_B=\frac{K_{Un}U_2-U_1}{U_1}\times100\%$ 和 $\delta=\delta_0+\delta_B$。其中 U_1 和 U_2 分别为一次和二次电压的有效值；K_{Un} 为额定电压比。

电容式电压互感器 由电容分压器与电磁单元组合而成的电压互感器。在正常使用条件下，电磁单元二次侧电压与加到电容分压器上的电压基本成正比，且相位接近于零，具有接地电磁式电压互感器的功能。与电磁式电压互感器相比，电容式电压互感器具有如下特点：①高电压主要由电容分压器承担，绝缘电气强度高；②电容分压器可兼做耦合电容器供高频载波通信使用。在超高压系统中，已基本取代了电磁式电压互感器；且由于使用它可避免构成电力系统工频谐振和铁磁谐振的条件，故在 220kV 以下的电力系统中，有更多采用电容式电压互感器的趋向。

电子式电压互感器 基于光学和电子学原理实现交流电压量值变换的仪器。（见电子式互感器）

电压互感器的额定一次电压从 380V 到 1000kV；额定

二次电压为 $100/\sqrt{3}$、100V。精密电压互感器除上述额定值外，还有其他额定电压值。

电压互感器的准确级别分 0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0。

使用时应注意：①二次侧不得短路；②高压电压互感器二次侧必须接地；③二次负荷不应超出其准确级别规定的负荷范围。

dianyayuan

电压源 （voltage sources） 其端电压与通过的电流无关的有源元件。它是一个二端电路元件，其端子间的电压保持为一恒定值或一确定的时间函数，而与通过它的电流无关。电压源中的电流可为任意值，随所接的外电路的不同而不同。当电压源的电压为某一恒定值时，称其为直流电压源；当为某一时间函数时，则可按其具体的函数形式而定名，如正弦电压源、方波电压源等。在电路理论中，电压源一般用图 1 所示的图形符号表示，直流电压源也可用图 2 中的图形符号表示。

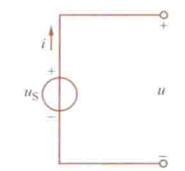


图 1　电压源的图形符号及电路

图 2　直流电压源的图形符号及电路

电压源的电压、电流关系，在如图 1 所示的参考方向下，可表示为

$$\begin{cases} u = u_S \\ i \text{ 可为任意值} \end{cases}$$

对于直流电压源，若把电压 u 和电流 i 分别取为纵坐标和横坐标，所画出的电压、电流关系曲线称为伏安特性曲线。电压源的伏安特性是一条与 u 轴交于 U_S 且与 u 轴垂直的直线，如图 3 所示。

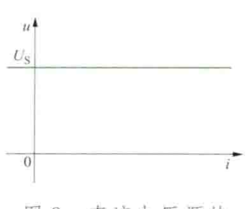


图 3　直流电压源的伏安特性曲线

实际电压源中，蓄电池、直流发电机、电子稳压电源等的伏安特性近似于直流电压源，但其端电压会随着电流的增加而有所减小，如图 4 所示。实际电压源的电路模型可用一个电压源和一个电阻的串联来表征，见图 5。图中 R_S 称为电源的内阻。当电流为 I 时，电源端电压的变化 $\Delta U = U_S - U$ 可视为其内阻的压降，即 $\Delta U = R_S I$。

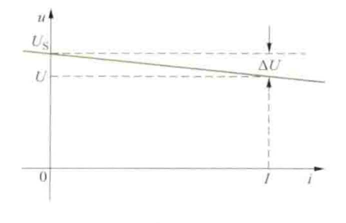


图 4　实际电压源的伏安特性曲线

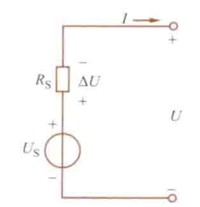


图 5　实际电压源的一种模型

三相电路中常采用三相电压源，可以看成是由三个二端电压源组合而成（见三相电源）。

dianyuan de dengxiao bianhuan

电源的等效变换 （equivalent transformation between sources） 有串联内电阻的电压源与有并联内电阻的电流源互相替代的一组变换公式。按照这组公式，用有并联内电阻的电流源代替有串联内电阻的电压源或者反过来，不影响电路其他部分的电压、电流。在电路分析中有时利用这种变换。

图 1 所示电压源的电压是 U_S，与它串联的内电阻是 R_{US}。图 2 所示电流源的电流是 I_S，与它并联的内电阻是 R_{IS}。它们之间的变换公式为

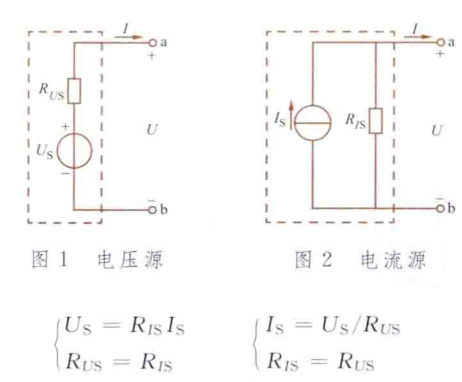


图 1　电压源　　图 2　电流源

$$\begin{cases} U_S = R_{IS} I_S \\ R_{US} = R_{IS} \end{cases} \qquad \begin{cases} I_S = U_S / R_{US} \\ R_{IS} = R_{US} \end{cases}$$

当满足上述变换公式时，称一个电源是另一个电源的等效电源。

dianyun fangdian

电晕放电 （corona discharge） 气体间隙在极不均匀电场作用下产生的气体局部放电现象。在电极表面有尖端或电极为很细的导线时，在那些电场很强而且超过气体击穿强度的表面附近产生局部放电，但并不发生整个间隙的击穿。此时，在电极表面可以观察到淡淡的发光层，并能听见咝咝的响声，这就是电晕放电。它属于一种自持放电形式（见气体击穿理论）。电晕放电可以是相对稳定的放电形式，也可以是不均匀电场间隙击穿过程中的早期发展阶段。

开始产生电晕的间隙电压和电极表面场强，分别称为电晕起始电压和电晕起始场强。架空输电线路导线电晕起始电场强度 E_C 可由皮克公式计算

$$E_C = 30\delta m\left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta R}}\right)\ (\mathrm{kV/cm})$$

式中 δ 为空气相对密度；m 为绞线系数；R 为导线半径，cm。实际上，导线表面状况如损伤、雨滴、附着物等，都会使电晕放电易于发生。

正极性与负极性的电晕相差很大。如，当细线加上正极性电压形成电晕时，电晕表现为一个均匀的蓝白色的鞘层，并布满整个细线的表面；当细线加上负极性电压时，电晕表现为沿着细线分布的粉红色辉光亮点。正电晕是由阳极附近的电子在强电场下形成的电子崩，以及电子崩产生的光子所造成的光电子等因素而形成的自持放电；而负电晕的自持放电由正离子和光子碰撞阴极而维持。工频交流电晕在正、负半周内其放电过程与直流正、负极性电晕基本相同。

电晕放电过程中会产生大量的带电粒子，从而在电晕电极周围形成空间电荷。以图 1 中的同轴圆柱电极为例，当内、

外电极的直径相差很大时，内电极表面场强很强而发生电晕放电。由于电子运动速度比正离子快得多，使得正负电晕的空间电荷有所不同，见图1（a）、（b）。正负电晕的内电极附近都积累着正的空间电荷。但是在外区的电荷符号与电晕电极的符号相同，这样就加强了外区中的电场，使得整个间隙中的电场分布趋于均匀。所以有时可利用产生电晕的方法来提高整个间隙的击穿电压。图2所示为研究电晕放电的电晕笼。

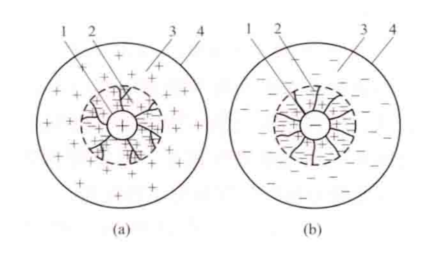


图1　同轴圆柱电极间发生电晕后的空间电荷示意图

（a）内电极为正极性；（b）内电极为负极性
1—电晕电极；2—电晕层（为了表达清楚图中厚度增大了）；3—外区；4—外电极

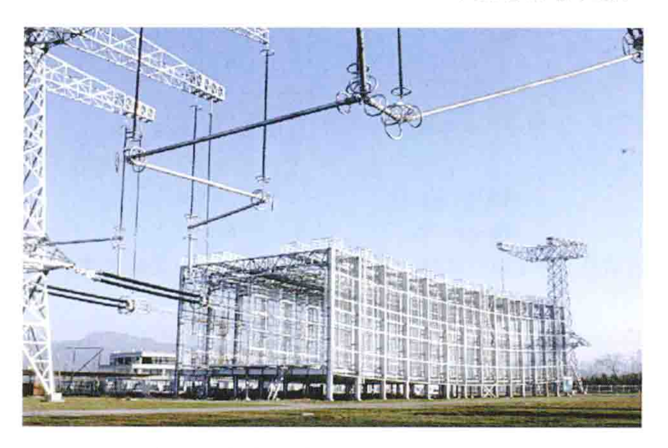


图2　中国北京直流特高压试验基地两厢电晕笼

高压输电线路导线上发生电晕，会引起可观的能量损失，称为电晕损失，每千米长输电线路的功率损失可达几十千瓦。此外还会引起电晕的环境效应，电晕放电包含有高频脉冲电流，会产生无线电干扰、电视干扰以及可听噪声干扰；对于直流输电线路，还会形成离子流。对于高电压电气设备，电晕放电产生的臭氧及氮化物与附近的金具及绝缘材料产生化学作用，会造成后者的腐蚀和老化，逐渐破坏设备绝缘性能。在高压输电线路中采用分裂导线，可降低导线的表面场强，从而减小线路的电晕及其危害。当线路出现雷电或操作过电压时，线路周围产生冲击电晕，能削弱过电压幅值。

电晕放电也具有很多工业应用，包括利用电晕放电原理而制成的静电除尘器、静电喷漆机、静电复印机、臭氧发生器、范德格拉夫静电发生器等。

dianzi dianlu

电子电路　(electronic circuits)

由电子元件和电子器件组成的电路。电子器件包括电子管、晶体管、场效应管以及各种类型的集成电路芯片。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“电子电路”部分。

参考书目

杨拴科．模拟电子技术基础．2版．北京：高等教育出版社，2010.

张克农，宁改娣．数字电子技术基础．2版．北京：高等教育出版社，2010.

dianziguan

电子管　(electronic tube)

借助电子在密封管壳内穿过真空在电极之间运动来实现电传导的真空电子器件，又称真空管。真空管内气体被排出，其电特性基本上不受剩余气体或蒸汽的影响。不同类型电子管的特性差别很大，主要与电极数目、电极结构、真空度、电子源的类型和发射能力诸因素有关。功率可由毫瓦级到几百兆瓦（峰值）级，工作频率可由0到10^{11} Hz。管壳类型有玻璃的、陶瓷的或金属的。

简史　1883年，美国T. A. 爱迪生（T. A. Edison）发现了热电发射效应（即爱迪生效应），但当时对它的机理并不清楚。1897年，英国J. J. 汤姆逊（J. J. Thomson）揭示出形成爱迪生效应的荷电粒子是电子，爱迪生效应乃是一种热电子发射现象。1904年，英国J. A. 弗莱明（J. A. Fleming）第一个把爱迪生效应付诸实用，发明了真空二极管。二极管的发明为无线电报接收提供了一种灵敏可靠的检波器。1906年，美国L. 德福雷斯特（L. de Forest）发明具有放大能力的真空三极管，为当时蓬勃发展的无线电报通信事业提供了一种极其有用的器件。继三极管后，又出现了四极管、五极管，更多电极的电子管和复合管，形成了包括收信管、发射管、低频管、高频管、微波管和超小型管等系列。

应用　电子管是电子器件的第一代。在晶体管发明以前的近半个世纪里，电子管几乎是各种电子设备中的关键器件。电子学随后取得的许多成就，如电视、雷达、计算机的发明都与电子管分不开。在固态电子学十分兴旺的现代，在一些领域中电子管仍是不可缺少的器件。例如：阴极射线管至今仍然应用于电视接收机、示波器和雷达显示单元等之中；摄像管用于电视摄像机；高频大功率管用于广播发射机；微波管则在雷达、电话、空间通信、自动控制和微波炉等方面获得广泛应用。

dianzi qijian

电子器件　(electronic devices)

利用和控制电子在真空、气体或半导体中的运动来实现电传导的一种器件。用它来实现电子电路中特定的功能，如信号的提取、放大、整形和传输，生产过程的自动检测、自动控制和保护等。器件的不断更新换代往往给电子电路功能带来极大的提高，甚至引起电路功能的革命性变化。电子器件包括真空电子器件、充气电子器件和半导体器件。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“电子器件”部分。

参考书目

Jones M. 电子管放大器．薛国雄，译．北京：人民邮电出版社，2013.

陈星弼，张庆中，陈勇著．微电子器件．3版．北京：电子工业出版社，2011.

dianzishi huganqi

电子式互感器　(electronic instrument transformer)

基于光学和电子学原理按比例变换电流或电压的仪器，也称光电互感器。随着电力生产、电力传输容量增加以及电力系

统电压等级不断提高，电磁式电流互感器和电压互感器暴露出难以满足绝缘要求、磁饱和、铁磁谐振、动态范围小、频带窄、易燃、易爆炸等缺点，无法适应电力系统进一步发展对准确测量电流、电压（尤其是高电压）的需求。随后研发出了电子式互感器。电子式互感器除可在电力系统安装使用外，还可用于测量大功率高频电流，且因其重量轻，也可制造便携式电子电流互感器。

电子式互感器具体分为电子式电压互感器和电子式电流互感器，按其传感头（感应拾取被测信号部分）是否使用电源，又分为无源式和有源式两种。

电子式电压互感器（EVT） 按照构建原理的不同，电子式电压互感器可分为无源 EVT 和有源 EVT 两类。

无源 EVT 依据泡克尔斯（Pockels）电光效应、克尔（Kerr）电光效应、逆压电效应、电致伸缩效应或电旋效应等原理构建。其中，基于泡克尔斯电光效应制成的较多，其基本原理是：在外加电压作用下，电光晶体由各向同性变为各向异性的双轴晶体，其折射率和通过晶体的光的偏振态发生变化，产生双折射；一束偏振光变成两束线偏振光，两线性偏振光分量的相速度不同，导致输出光信号产生相位差 $\Delta\varphi$。$\Delta\varphi$ 与外加电压 u 的关系为 $\Delta\varphi=\pi u/U_{\pi}$，其中，$U_{\pi}$ 为半波电压，即相位差为 180°时对应的电压。因此只要测出相位差 $\Delta\varphi$，就可得到被测电压 u。基于泡克尔斯效应测量电压的原理见图 1。

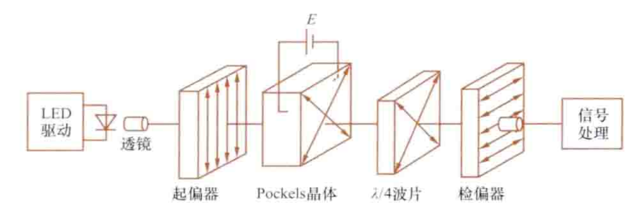


图 1　基于泡克尔斯效应测量电压的原理示意图

有源 EVT 利用传统的电阻分压器、电容分压器以及单个电容器等测量电压值，采用光纤作为一次转换器与二次转换器之间的传输系统，并由电子电路完成测量信号的传输和放大，被测电压以模拟量或数字量形式输出。

电子式电流互感器（ECT） 按照构建原理的不同，电子式电流互感器可分为无源 ECT 和有源 ECT 两类。

无源 ECT 基于法拉第磁光效应、克尔磁光效应、逆压磁效应、铁氧体磁畴效应、磁致伸缩效应以及电热效应等原理构建。其中，基于法拉第磁光效应制成的较多，其基本原理是：用磁光玻璃或单模光纤作传感元件，当一束线偏振光通过置于磁场中的磁光玻璃或单模光纤时，线偏振光的偏振面会在平行于光线方向的磁场作用下旋转。根据磁光效应和安培环路定律，该偏振面旋转的角度 θ 与产生磁场的电流 I 之间有如下关系 $\theta=\mu_0 V\oint \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=\mu_0 VKI$，其中，$V$ 代表磁光材料的费尔德（Verdet）常数；K 为系数，当通光路径围绕通流导体一周时，$K=1$；角度 θ 与被测电流 I 成正比。所以，通过测量通流导体周围线偏振光偏振面的变化，就可间接测量出导体中的电流。基于法拉第效应测量电流的原理见图 2。

有源 ECT 作为有源 ECT 一次电流采样传感头的元件，有传统的电磁式电流互感器、电阻分流器以及罗戈夫斯基（Rogowski）线圈等，其中罗戈夫斯基线圈应用最多，

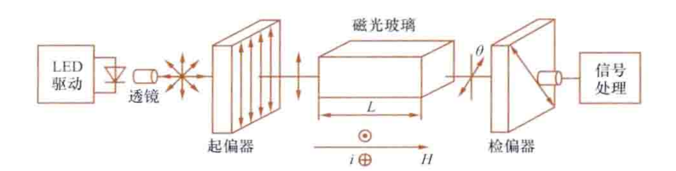


图 2　基于法拉第效应测量电流的原理示意图

原理接线见图 3。罗戈夫斯基线圈中的感应电动势 $e(t)$ 为

$$e(t)=-\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}=-M\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

式中 Ψ 为磁链；M 为罗戈夫斯基线圈的互感，它仅与线圈的材料和尺寸有关。测量 $e(t)$，经折算即可得到被测电流。

有源电子式互感器的传感头将采集到的被测电压、电流信号，经光纤调制后，传至低压侧进行分离、还原等处理。对其在高电位端传感头的供电，有基于母线、激光、蓄电池和超声电源等多种，应用较多的是激光和母线供能。如以激光方式，即低电位端激光器发出的强光经光纤传输到高电位端，经光电转换器转化为电能，为高电位端的电子电路供电。

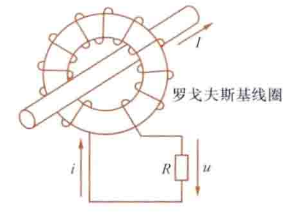


图 3　基于罗戈夫斯基线圈测量电流的原理接线图

特点 与电磁式互感器相比，电子式互感器具有如下特点：①绝缘结构简单，体积小，重量轻，造价低；②无铁芯、无磁饱和、不引发铁磁谐振；③抗电磁干扰性能好，不存在低压侧开路出现高电压的危险；④频率响应范围宽，动态范围大，测量准确度高；⑤不充油，无燃烧、爆炸等危险；⑥适应电能计量及保护的数字化、自动化、智能化发展趋势。

dianzishuguan

电子束管

（electron-beam tube） 性能取决于一个或多个电子束的形成和控制的真空电子器件。第一只电子束管于 18 世纪末问世，后来出现了仪用示波管。20 世纪 30 年代初相继出现了电视显像管和摄像管。在第二次世界大战中随着雷达的发展研制了定位管、存储管和变像管等。电子束管根据信号转换形式大致分为四类：①电信号转换为光学图像者，如示波管、显像管、定位管等。②光学图像转换为光学图像者，如变像管等。③光学图像转换为电信号者，如电视摄像管、光电倍增管等。④电信号转换为电信号者，如存储管等。

电子束管种类很多，包括示波管、定位管、显像管、存储管、摄像管、变像管和像增强管，它们在国防、工业、医学、科学研究、民用等方面得到广泛应用。

示波管 能在荧光屏上显示随时间变化的电信号波形的电子束管。其电子束的聚焦和偏转一般采用静电式的。工作时给水平偏转板加锯齿波电压，以实现时基扫描；给垂直偏转板加信号电压，以便在荧光屏上显示信号波形。（见阴极射线示波管）

定位管 又名雷达指示管，装于雷达装置中用来显示目标的位置和距离的电子束管。

显像管 能将电视视频信号转换为电视图像的电子束管。电子束在偏转磁场的作用下对荧光屏进行行扫描和帧扫

描，视频信号加在调制电极或阴极上。分黑白显像管和彩色显像管两类。彩色图像是按三基色（红、绿、蓝）图像相加的原理来实现的。

存储管 能将信息（信号）存储（记录或记忆）并能一次或多次阅读（重现）的电子束管。可用于雷达上作高亮度目标显示、制造存储示波器、电缆故障检测以及医学方面的检测等。

摄像管 将光学图像转变成电信号的电子束器件。分两大类：利用光电阴极作为光电转换元件；利用光电导体作为光电转换元件。

变像管和像增强管 均属于光电成像器件，能将红外线和紫外线等不可见辐射所构成的图像及微光图像变换成可见的图像，是夜视仪器的核心器件，用于国防。

dianzu

电阻

（resistance） 导电物体阻碍传导电流通过的能力。一物体在其两端加上恒定电压 U_{ab} 后，物体中有传导电流 I 流过，该物体的电阻 $R_{ab}=U_{ab}/I$。如电压的单位为伏［特］(V)，电流的单位为安［培］(A)，则电阻的单位为欧［姆］(Ω)。物体中通有电流后，产生热量使物体温度升高，热量散失于周围介质，故具有电阻的元件是耗能元件。这个概念还可推广，在恒定电流的条件下，凡是能把电能转换成其他形式的能量（如热能、机械能等）的元件，并且这一过程为不可逆过程，都可以用一等效电阻来表示这个元件的耗能特性。用来提供电阻的器件称为电阻器。电阻的倒数称为电导。电导的单位为西［门子］(S)。

线性电阻与非线性电阻 对大多数导体来说，在一定的温度下，如果电阻器的伏-安特性曲线（电压-电流平面上的一条曲线）在所有时间都是经过原点的直线，则这类电阻称为线性电阻。有些材料的电阻明显地随着电流（或电压）而变化，其伏-安特性曲线是一条曲线，这类电阻称为非线性电阻。非线性电阻在某一给定的电压（或电流）作用下，电压与电流的比值为在该工作点下的静态电阻，伏-安特性曲线的斜率为动态电阻。表达非线性电阻特性的方式比较复杂，这些非线性关系在电子电路中得到了广泛的应用。

直流电阻与交流电阻 当通过导体的电流是交变电流时，由于趋肤效应，特别是交变电流频率很高时，电流几乎集中在导体表面处，相当于导体的有效截面积减少，电阻增加，这时的电阻称为交流电阻，它大于导体通过恒定电流时的直流电阻。

电阻的串、并联 将多个电阻元件按不同方式加以连接，可以改变其总电阻。串联时总电阻为各个电阻之和，并联时总电阻是各个电阻的倒数总和的倒数。

绝缘电阻 用绝缘材料隔开的两个导体之间的直流电阻叫绝缘电阻。用绝缘电阻的大小可以判断绝缘材料的绝缘状态。


接地电阻表

接地电阻 电力系统中为了工作或安全需要，把电气设备的一部分与大地连接，这就是接地。接地时常用导线与埋入大地中的电极相连接。反映接地状况优劣的一个重要参数是接地电阻，它等于电极电位与无限远电位之差与通过电极流入大地电流的比值。接地电阻由电极本身的电阻、电极与土壤之间的接触电阻、土壤电阻三项组成。在这三个电阻中，与土壤电阻相比，电极电阻和接触电阻都很小，接地电阻主要是土壤电阻。图示为接地电阻表。

dianzu cailiao

电阻材料

（resistive materials） 制造电阻器的材料。制造电阻器必须选用不良导体。一般选用电阻率较高、容许温升较高、便于加工的金属导体。常用的金属电阻材料有铜镍合金、铜锰合金、镍铬合金、镍铬铁合金、铁铬合金和灰铸铁等。电阻的功能除限制电流、消耗能量、产生热量外，还有许多特殊用途，有些专用于测量，如标准电阻器等。

制造标准电阻器、电桥、电位差计等精密测量仪表所用的电阻材料称为计测电阻材料。滑线变阻器和电位器等元件在电路中用于调节电流的大小。从电动机起动用的大电流变阻器到电子线路中的小电流变阻器均需在很宽的范围内改变其电阻值，制造调节电阻的材料称为调节电阻材料。用于制造各种电热器的电阻材料称为发热电阻材料，它们应能在高温下工作，常用的有镍铬合金和铁铬合金。但由于熔点不够高，只能在 1000℃ 下使用。在要求温度更高时需用钨、钼等特种金属，多数用于制造白炽灯丝。这种材料也称为发光电阻材料。

在电子技术中广泛使用金属膜电阻和碳膜电阻，制造这一类电阻的材料称为薄膜电阻材料。此外，在非电量电测技术方面，常通过测量电阻的变化来测量应变和应力、温度、湿度，甚至测量磁通密度等，诸如此类的电阻材料各有其特殊要求，统称为特殊电阻材料。其中包括力敏电阻材料、温敏电阻材料、湿敏电阻材料、磁敏电阻材料等。总之，不同的用途需选用不同的电阻材料。

dianzu celiang

电阻测量

（resistance measurement） 基本电参数电阻的测量。电阻的单位为欧（Ω）。电阻按其数值大小可分为低值电阻（10Ω 以下）、中值电阻（$10\sim10^6$ Ω）和高值电阻（10^6 Ω 以上）。测量电阻的方法有伏安表法、两电压表法、欧姆表法、安-瓦表法及电桥法等。选择测量方法时，需考虑被测电阻的性质、数值大小以及对测量准确度的要求。

伏安表法 用直流电压表、电流表测量被测电阻两端的电压及通过它的电流，据测得的电压与电流之比求得电阻值。测量电路有两种接法，如图 1 所示。图中 R、V、A 分别为被测电阻、电压表、电流表；U、I 分别为电压表、电流表的示值。两种接法的差别在于电压表、电流表的相对位置不同。对图 1(a) 接法，$U/I=R+r_A$（r_A 为电流表内阻），仅当 $r_A \ll R$ 时，$U/I\approx R$，即它适用于被测电阻

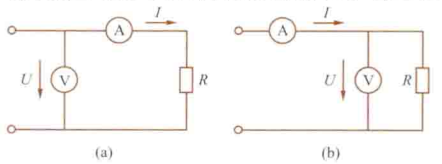


图 1 伏安表法原理接线
(a) 电压表接于电流表之前；
(b) 电压表接于电流表之后

值较大的情况。对图 1（b）接法，$U/I=1/(1/R+1/r_V)$（r_V 为电压表内阻），仅当 $r_V \geqslant R$ 时，$U/I \approx R$，则它适于被测电阻值较小的情况。

除了仪表的内阻外，引起电阻测量误差的因素还有引线电阻、接触电阻、漏电阻、热电势、电阻自身发热等。对不同数值电阻的测量，这些因素的影响程度不同，要采取不同措施来处理。对低值电阻的测量，引线电阻和接触电阻是造成测量误差的主要因素；被测电阻需具有四端结构（见图2），以便排除引线电阻和接触电阻的影响。对高值电阻，支承电阻的绝缘支架会有漏电流通过，相当于在 R 两端并联有一个漏电阻 r（见图 3），影响测量准确度。为此，要在 R 的一个端钮周围设置金属屏蔽环 S，以使漏电流不流经电流表。虽然伏安表法误差稍大，但可在工作条件下实施测量，所以适合于测量非线性电阻。

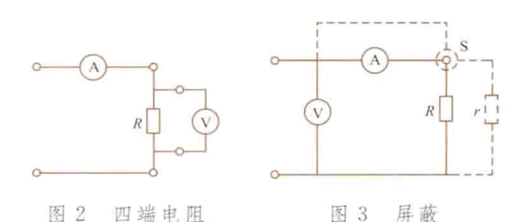


图 2　四端电阻　　　图 3　屏蔽

两电压表法　将被测电阻 R 与标准电阻 R_S 串联，通过同一电流 I，测得 R 和 R_S 两端的电压，根据电阻上压降与阻值成正比的关系即可求得 R 值。在分别与 R 及 R_S 并联的电压表 V1 和 V2 的内阻趋于∞条件下，有 $R=R_SU_1/U_2$，其中 U_1、U_2 分别为 V1、V2 的示值。此法多用于测量低值电阻。采用数字电压表或直流电位差计测量电压，可满足电压表内阻趋于∞的条件。

欧姆表法　包括用万用表中的欧姆挡及绝缘电阻表等测量电阻。指针式万用表主要用于测量中值电阻，准确度一般较低。数字万用表的阻值测量范围较宽，准确度也较高。绝缘电阻表用于测量电机、电器、电线、电缆等的绝缘电阻。

安-瓦表法　用交流电流表、功率表测量交流电阻的方法。对阻抗 Z 的交流电阻 R，除了 Z 在直流情况下的电阻外，有时还包括了代表铁芯损耗或介质损耗的等效电阻。此外，交流电阻常与其他电参数如电感、电容等混合在一起。因此常采用三表法，即通过测量阻抗两端的电压、阻抗中电流 I 以及阻抗消耗的功率 P 来确定阻抗、电抗和电阻。阻抗 Z 的交流电阻 R 可按公式 $R=P/I^2$ 计算。

电桥法　见直流单比电桥、直流双比电桥及交流电桥。

dianzu fenyaqi

电阻分压器

（resistor voltage divider）　见分压器。

dianzulü

电阻率

（resistivity）　表示物质导电性能的参数，电阻率越小，物质导电性能越强。电阻率 ρ 等于均匀材料单位立方体积的两个相对平面间的直流电阻值。电阻率的单位是欧［姆］米（Ω·m）。取一段均匀材料，其长度为 l，截面为 S，测量出这段材料的电阻 R 后，从式 $\rho=RS/l$ 可求出材料的电阻率。纯金属在室温下，银的 ρ 值最小，铜其次，大多数金属及合金钢的电阻率大约为 10^{-6} Ω·m。而绝缘材料的电阻率在 $10^8 \sim 10^{16}$ Ω·m 范围。

电导率　电阻率的倒数。电导率 γ 是衡量材料导电性能的一个参数，单位是西［门子］每米（S/m）。常见金属材料的电导率见表。

常见金属材料的电导率（0℃时）

金属名称	电导率×10^6 (S/m)	金属名称	电导率×10^6 (S/m)
银	66	钨	20.4
铜	64.5	钾	16
金	49	锂	11.8
铝	40	铁	11.5
镁	25.4	铯	5.2
钠	23.4		

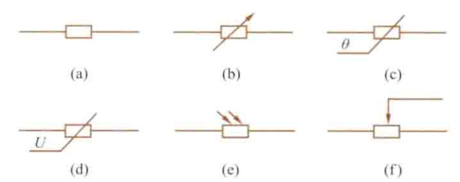
影响电阻率的外界因素　电阻率不仅与材料种类有关，而且还与温度、压力和磁场等外界因素有关。金属材料在温度不高时，ρ 与温度 t(℃) 的关系是 $\rho_t=\rho_0(1+\alpha t)$，式中 ρ_t 与 ρ_0 分别是 t ℃和 0℃时的电阻率；α 是电阻率的温度系数，与材料有关，它的单位是 K^{-1}（K 是热力学温度的单位符号，单位名称是开［尔文］，1K=1℃）。锰铜的 α 约为 1×10^{-5} K^{-1}，数值极小，用其制成的电阻器的电阻值在常温范围下随温度变化极小，适合于作标准电阻。已知材料的 ρ 值随温度变化的规律后，可用该材料制成电阻式温度计来测量温度。半导体材料的 α 一般是负数，且有较大的量值，制成的电阻式温度计具有较高的灵敏度。有些金属（如 Nb 和 Pb）或它们的化合物，当温度降到热力学温度几开［尔文］或十几开［尔文］时，ρ 值突然减少到接近于零，出现超导现象，超导材料有广泛的应用前景。利用材料的 ρ 值随磁场或所受应力而改变的性质，可制成磁敏电阻或电阻应变片，分别用来测量磁场或物体所受到的机械应力，在工程上有广泛应用。

dianzuqi

电阻器

（resistor）　电路中限制电流通过的二端电路元件，简称电阻，通常用“R”表示，基本单位是欧姆，用希腊字母 Ω 表示。

用途　根据用途，电阻器可用不同导电性能的材料制成，有一定结构形式。在一定的环境条件下电阻值不可变的称为固定电阻器，电阻值可变的称为可变电阻器（电位器）。普通的电阻器多为线性的，即通过电阻器的电流和端电压成正比；而一些特殊的电阻器，如热敏电阻器、压敏电阻器、光敏电阻器等则为非线性的，它们应用于一些特殊电路之中，充当敏感元件。电阻在电路中的表示方法如图所示。



电阻的电路符号

（a）固定电阻器；（b）可调电阻器；（c）热敏电阻器；（d）压敏电阻器；（e）光敏电阻器；（f）电位器

电阻器在电路中除起限制电流作用外，还用于调节和稳定电流与电压。在电子电路中电阻器与电容器、电感器及电子器件组成复杂电路结构，是电子电路中应用数量最多的元件。

分类　按结构型式和制造材料可分为：①碳质实心电阻器，由碳质电阻材料模压而成，为早期产品。②线绕电阻

器，功率较大，用镍铬、锰铜等合金线绕在陶瓷圆柱棒上并涂以玻璃釉或漆构成。③碳膜电阻器。④金属氧化膜电阻器等。按用途可分为：通用、精密、高压、高阻、高频、大功率、保险型电阻器等。

20 世纪 60 年代以来，随着集成电路的发展，对电阻器的性能提出了更高的要求，同时要求它向平面化、集成化、微型化方向发展。现代科学技术的发展使原来由电子器件、电阻器等构成的分立元件电子电路大量由集成电路组件所取代，电阻器已完全融合在集成电路之中。

主要参数　表征电阻特性的主要参数有：标称电阻值及其允许偏差、额定功率、负荷特性、电阻温度系数等。①标称电阻值是设计阻值，一般用数字或色环表示在电阻器上。②允许偏差为实际阻值与标称阻值间允许的最大偏差，以百分数表示，高精度的可达 0.001%。③额定功率是电阻器在额定温度（最高环境温度）下连续工作所允许耗散的最大功率。通常厂家按功率和阻值形成不同系列，供用户选用。当工作环境温度低于电阻器的额定温度时，电阻器不能超过其额定功率使用；当超过额定温度时，则必须在降低功率下使用。④电阻温度系数为在规定的环境温度范围内，温度每改变 1℃时阻值的平均相对变化，用 $10^{-6}/℃$ 表示。除以上主要参数外还有非线性（电流与所加电压特性偏离线性关系的程度）、电流噪声（电阻体内因电流流动产生的噪声电动势的有效值与测试电压之比，用电流噪声指数表示）、高频特性（由于电阻体内分布电容和分布电感的影响，使阻值随工作频率增高或下降的性能）等参数，这些参数在某些使用条件下亦可能成为关键参数。

diejia dingli

叠加定理

（superposition theorem）　描述线性系统或线性电路中响应和激励呈线性关系的定理。设有两个或两个以上的激励同时作用于线性系统或线性电路，则响应等于各激励分别作用下的各响应之和。这便是叠加定理的具体内容。

无记忆线性系统（电路）中的叠加定理　“无记忆”一词，表示瞬时响应只和该瞬时的激励有关。对于无记忆线性系统，叠加定理成立。如图 1（a）所示非时变电阻电路是无记忆线性电路（见动态电路分析）。图中，两个独立电压源 U_{S1}、U_{S2} 是激励，电流 I_1、I_2 和电压 U_3 是三个响应。图 1（b）、（c）表示激励源分别作用于该电路，电流 I'_1、I'_2 和电压 U'_3 与电流 I''_1、I''_2 和电压 U''_3 是对应的响应。由叠加定理得

$$I_1 = I'_1 + I''_1$$

$$I_2 = I'_2 + I''_2$$

$$U_3 = U'_3 + U''_3$$

记忆线性系统（电路）中的叠加定理　“记忆”一词，代表响应依赖于激励、激励对时间的导数、激励对时间的积分等。对于记忆线性系统，叠加定理只适用于零状态响应。如图 2（a）所示的非时变电路中含线性电感和线性电容，它是记忆线性电路（见动态电路分析）。图中两个电压源 $u_{S1}(t)$ 和 $u_{S2}(t)$ 是激励，电流 i_1、i_2 和电压 u_3 是响应。图 2（b）、（c）表示两个激励电源分别作用于该电路，电流 i'_1、i'_2 和电压 u'_3 与电流 i''_1、i''_2 和电压 u''_3 是对应的响应。在三个图中，两个开关合下之前，电容的电压是零，电感的电流是零，从而上述所有响应都是零状态响应。三个图中的两个开关，都在初始时刻 t_0 时合下。由叠加定理得

$$i_1(t) = i'_1(t) + i''_1(t)$$

$$i_2(t) = i'_2(t) + i''_2(t)$$

$$u_3(t) = u'_3(t) + u''_3(t)$$

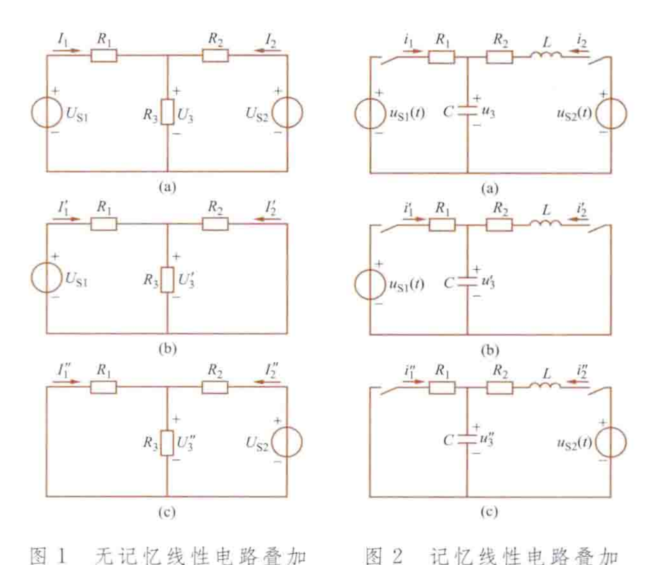


图 1　无记忆线性电路叠加定理示意图

（a）电压源 U_{S1}、U_{S2} 同时作用；（b）U_{S1} 单独作用；（c）U_{S2} 单独作用

图 2　记忆线性电路叠加定理示意图

（a）电压源 u_{S1}、u_{S2} 同时作用；（b）$u_{S1}(t)$ 单独作用；（c）$u_{S2}(t)$ 单独作用

应用举例　不对称三相正弦电压作用于线性三相电路时，首先将三相电压分解为正序、负序和零序三个对称分量组（见对称分量法），分别计算出每个分量组作用下的响应，然后用叠加定理将这些响应叠加就得到真实响应。

叠加定理和线性算子　对数学中的线性算子，由该算子的可加性和齐次性定义可知：叠加定理适用于线性算子的变量是自然结论。因此，在任何技术学科里，只要研究的变量之间由线性算子联系着，它们就服从叠加定理。

dongtai cixing celiang

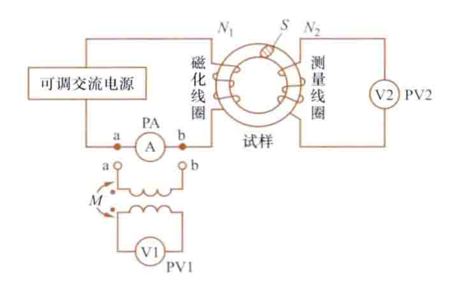
动态磁性测量

（dynamic magnetic characteristics measurement）　交变磁场磁化下磁性材料磁特性的测量。在电工领域，交变磁场的频率通常在音频范围内（含工频）。动态磁特性的测量主要包括动态磁化曲线、动态磁滞回线以及铁损、复数磁导率等的测量。

在交变磁场磁化下，铁芯中的涡流增加铁芯损耗，也导致磁通的趋肤效应，使铁芯中磁通密度 B 的分布不均匀。越靠近铁芯表面，磁通密度越强，材料越容易达到饱和。在动态磁性测量中，通常测到的是试样的平均磁通密度和其表面处的磁场强度。

由于存在铁芯损耗和趋肤效应，磁性材料的动态磁特性比静态的要复杂得多。它不仅与磁性材料本身有关，还与由其制成的试样厚度、磁化场的频率、测试时磁场强度和磁通密度的波形以及测试方法等有关。因此，对同种磁性材料的不同试样或不同种磁性材料的试样，应在相同条件下测量，以便于比较。动态磁性测量主要有伏安表法和示波器法，也可用动态磁性自动测量仪进行测量。

伏安表法测动态磁化曲线　测量线路如图所示。在被测磁性材料环形试样上均匀缠绕磁化线圈和测量线圈，磁化线圈经过有效值电流表 PA 连接到可调交流电源，测量线圈则与平均值电压表 PV2 相连。根据 PV2 的示值 U_2、测量线圈匝数 N_2、交流电源频率 f 及试样等效截面积 S，可计算出试样中磁通密度的幅值 $B_m = U_2/(fN_2S)$。



伏安表法测动态磁化曲线的原理接线图

当磁化场为正弦波形时，用 PA 测出磁化电流 I，则试样中磁场强度的幅值为 $H_m = \sqrt{2}N_1I/l$，其中 N_1 为磁化线圈匝数，l 为试样磁路的有效长度。当磁化电流为非正弦时，需用互感为 M 的标准互感器及平均值电压表 PV1 的组合来代替 PA（见图）。此时，$H_m = \sqrt{2}N_1U_1/(4fMl)$，其中 U_1 是 PV1 的示值。

调节交流电源电压，可获得动态磁化曲线。这种方法的误差为±(3～10)%。

示波器法测动态磁滞回线　在被测磁性材料环形试样上均匀缠绕磁化线圈和测量线圈，在磁化回路中串入一取样电阻器，由此取出与磁场强度 H 有关的信号，并加到示波器的 X 轴上。磁通密度信号 B 取自测量线圈。测量线圈上的感应电动势经积分器后加至示波器的 Y 轴。如此，在示波器屏幕上就会显示出被测磁性材料的动态磁滞回线。

示波器法测量线路简单，使用方便，可在较宽频率范围内直接观察和拍摄被测磁性材料的磁滞回线，根据该回线还可确定被测材料的有关磁参量。此法不仅能用于环形封闭试样，也能用于开磁路被测磁性材料试样，测量误差一般为±(7～10)%。

动态磁性自动测量仪测磁滞回线和磁化曲线　此法的特点是采用电子积分器和采样保持环节，将快速变化的信号变换成为波形相似的缓慢变化信号，再用 x-y 记录仪记下被测磁性材料的动态磁滞回线和磁化曲线。

dongtai dianlu fenxi

动态电路分析 (dynamic circuit analysis)

对含有电容、电感等储能元件电路的分析和计算。

不含储能元件的电路称为电阻性电路。描述电阻性电路的方程是代数方程。它在任一时刻的响应只与该时刻的激励有关，而与该时刻以前的激励无关。因而，电阻性电路是“无记忆”的，或说是“即时的”。由于电容元件和电感元件的电压和电流关系都涉及对电流、电压的导数或积分，所以称为动态元件。含有这类元件的电路称为动态电路。动态电路在任一时刻的响应与电路过去的历史情况（过去的激励和连接情况等）有关。如，在动态电路中，即使输入从某一时刻起就不再起作用，但此后仍然可以有输出，因为输入曾经作用过，即动态电路是“有记忆”的。

描述动态电路的方程是常微分方程或积分-微分方程。如果电路中电感、电容和电阻都是线性非时变元件，则电路方程可归结为常系数线性微分方程。如果电路中含有非线性元件，则动态电路方程将是非线性微分方程。

可以分别在时域、频域和复频域中分析动态电路（见动态电路时域分析、动态电路频域分析和动态电路复频域分析）。

根据线性电路的基本特性，往往将线性动态电路的全响应分解为自由响应与强迫响应，或者分解为零输入响应与零状态响应。后一种分解方法有利于使分析问题简化或便于进行某些物理解释。在动态电路分析中，研究电路对某些典型（基本）信号的响应具有重要意义，如电路对阶跃信号的响应（见阶跃响应）、对冲激信号的响应（见冲激响应）等。

在动态电路中会出现过电流、过电压、振荡等现象。有些实际电路和电气设备就是基于这些现象工作的，如振荡器等。在电力系统中往往要设法避免这些现象的出现，以防由其引起的危害。此外，动态电路的基本规律又反映出一般动态系统（如机械系统、电力系统、自动控制系统等）的普遍规律。

dongtai dianlu fupinyu fenxi

动态电路复频域分析 (complex frequency-domain analysis of dynamic circuits)

应用拉普拉斯变换方法在复频域中分析动态电路。拉普拉斯变换是一种积分变换，常用以求常系数线性微分方程和偏微分方程的解。线性非时变集总参数动态电路是用常系数线性微分方程描述的，线性非时变分布参数电路是由相应的偏微分方程描述的。因而，对于这些电路可借助拉普拉斯变换方法进行分析。

拉普拉斯变换　简称拉氏变换。拉氏变换可分为单边拉氏变换和双边拉氏变换。此处只介绍单边拉氏变换的定义。

设时间 t 的函数 $f(t)$，当 $t<0$ 时 $f(t)=0$，它的拉氏变换 $F(s)$ 定义为

$$F(s) = \mathscr{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st}\,dt$$

其中 $s=\sigma+j\omega$，σ、ω 为实数，$j=\sqrt{-1}$，s 称为复频率。如果当 $\sigma>\sigma_0$ 时，上式的积分收敛，则 $f(t)$ 的拉氏变换存在。使以上关系成立的最小的 σ_0 值称为收敛坐标。$F(s)$ 也称为 $f(t)$ 的象函数，而 $f(t)$ 称为 $F(s)$ 的原函数。给定一原函数 $f(t)$，可由定义式求其象函数；反之，由象函数 $F(s)$ 可按下式求其原函数 $f(t)$

$$f(t) = \mathscr{L}^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st}\,ds,\ c>\sigma_0$$

根据拉氏变换的定义式，可以求出不同的原函数 $f(t)$ 的象函数 $F(s)$。许多数学手册上都载有 $f(t)$ 和 $F(s)$ 对应关系的表以供查阅。表中所给出的是常用函数的拉氏变换关系。

常用函数的拉氏变换表

$f(t)$	$F(s)$	$f(t)$	$F(s)$
$u(t)$	$1/s$	$\delta(t)$	1
e^{-at}	$1/(s+a)$	$\sin\omega_0 t$	$\omega_0/(s^2+\omega_0^2)$
$\cos\omega_0 t$	$s/(s^2+\omega_0^2)$	t^n	$n!/s^{n+1}$

拉普拉斯变换的基本性质　在利用拉氏变换方法分析动态电路时，借助拉氏变换的一些性质可使问题简化。其主要性质有：若 $\mathscr{L}[f_1(t)]=F_1(s)$、$\mathscr{L}[f_2(t)]=F_2(s)$、$\mathscr{L}[f(t)]=F(s)$，则

(1) 线性。对任何常数 k_1、k_2 有

$$\mathscr{L}[k_1f_1(t)+k_2f_2(t)]=k_1F_1(s)+k_2F_2(s)$$

（2）对 t 微分

$$\mathscr{L}\left[\frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\right]=sf(s)-f(0)$$

（3）对 t 积分

$$\mathscr{L}\left[\int_{-\infty}^{t}f(\tau)\mathrm{d}\tau\right]=\frac{F(s)}{s}+\frac{f^{-1}(0)}{s}$$

式中 $f^{-1}(0)=\int_{-\infty}^{0}f(\tau)\mathrm{d}\tau$

（4）延时。设 t_0 是正值常数，有

$$\mathscr{L}[f(t-t_0)]=\mathrm{e}^{-st_0}F(s)$$

（5）s 域平移

$$\mathscr{L}[f(t)\mathrm{e}^{-\alpha t}]=F(s+\alpha)$$

（6）尺度。设 a 是正值常数

$$\mathscr{L}[f(at)]=\frac{1}{a}F\left(\frac{s}{a}\right)$$

（7）初值定理。若初值 $\lim\limits_{t\to 0}f(t)$ 存在，则有

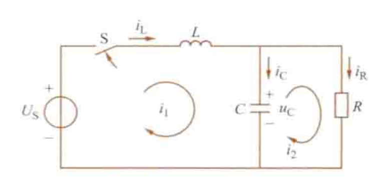
$$\lim_{t\to 0}f(t)=\lim_{s\to\infty}sF(s)$$

（8）终值定理。若终值 $\lim\limits_{t\to\infty}f(t)$ 存在，则有

$$\lim_{t\to\infty}f(t)=\lim_{s\to 0}sF(s)$$

（9）卷积

$$\mathscr{L}\left[\int_{0}^{t}f_1(\tau)f_2(t-\tau)\mathrm{d}\tau\right]=F_1(s)F_2(s)$$



动态电路图

分析举例　电路如图所示。已知 $U_S=15\text{V}$，$L=1\text{H}$，$C=1\text{F}$，$R=0.4\Omega$；$t=0$ 时开关S闭合，此时 $u_C(0)=0$，$i_L(0)=0$，求 i_L、i_R、i_C。解题步骤如下：

（1）列写电路微分方程。设回路电流 i_1、i_2，列回路方程

$$\left.\begin{aligned}&L\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{C}\int_0^t(i_1-i_2)\mathrm{d}t+u_C(0)=U_S\\&-\frac{1}{C}\int_0^t(i_1-i_2)\mathrm{d}t-u_C(0)+Ri_2=0\end{aligned}\right\}$$

起始条件：$u_C(0)=0$，$i_1(0)=0$。

（2）用拉氏变换将微分方程变换成相应的以象函数为变量的代数方程。设象函数 $I_1(s)=\mathscr{L}[i_1(t)]$，$I_2(s)=\mathscr{L}[i_2(t)]$。对微分方程中各项进行拉氏变换，得

$$\left.\begin{aligned}&\left(sL+\frac{1}{sC}\right)I_1(s)-\frac{1}{sC}I_2(s)=U_S/s\\&-\frac{1}{sC}I_1(s)+\left(R+\frac{1}{sC}\right)I_2(s)=0\end{aligned}\right\}$$

代入参数数值

$$\left.\begin{aligned}&\left(s+\frac{1}{s}\right)I_1(s)-\frac{1}{s}I_2(s)=\frac{15}{s}\\&-\frac{1}{s}I_1(s)+\left(0.4+\frac{1}{s}\right)I_2(s)=0\end{aligned}\right\}$$

（3）从代数方程中，解出象函数

$$I_1(s)=\frac{15(s+2.5)}{s(s^2+2.5s+1)}$$

$$I_2(s)=\frac{37.5}{s(s^2+2.5s+1)}$$

象函数一般为含 s 的有理函数，可展开为部分分式，得

$$I_1(s)=\frac{37.5}{s}+\frac{2.5}{s+2}-\frac{40}{s+0.5}$$

$$I_2(s)=\frac{37.5}{s}+\frac{12.5}{s+2}-\frac{50}{s+0.5}$$

（4）进行拉氏反变换，将象函数 $I_1(s)$、$I_2(s)$ 变换成原函数，可直接查表，得

$$\left.\begin{aligned}&i_1=37.5+2.5\mathrm{e}^{-2t}-40\mathrm{e}^{-0.5t}\ \ (\text{A})\\&i_2=37.5+12.5\mathrm{e}^{-2t}-50\mathrm{e}^{-0.5t}\ \ (\text{A})\end{aligned}\right\}t\geqslant 0$$

于是各支路电流为

$$i_L=i_1$$
$$i_R=i_2$$
$$i_C=i_1-i_2=-10\mathrm{e}^{-2t}+10\mathrm{e}^{-0.5t}\ \ (\text{A}),\ t\geqslant 0$$

dongtai dianlu pinyu fenxi

动态电路频域分析　（frequency domain analysis of dynamic circuits）　应用傅里叶变换方法在频域内分析动态电路。傅里叶变换是数学上的一种积分变换，工程技术上常用以对各种信号进行分析；对激励作用的线性电路或系统的响应进行计算。

傅里叶变换　实变量 $t(-\infty<t<\infty)$ 的函数 $f(t)$ 的傅里叶变换 $F(\mathrm{j}\omega)$ 定义为

$$F(\mathrm{j}\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}t$$

上式存在的充分条件是：$f(t)$ 在 t 轴上绝对可积，即 $\int_{-\infty}^{\infty}|f(t)|\mathrm{d}t<\infty$；$f(t)$ 在任何有限区间内只有有限个第一类间断点和有限个最大、最小值。这就是所谓的狄利克雷（Dirichlet）条件。在电路和系统分析中，常将上式中的 t 视为时间变量，ω 便是角频率（以下简称频率）变量。称 $F(\mathrm{j}\omega)$ 为 $f(t)$ 的傅里叶变换，将它简记作 $F(\mathrm{j}\omega)=\mathscr{F}[f(t)]$。由上述定义式即可对给定的 $f(t)$ 求出 $F(\mathrm{j}\omega)$。对给定的 $F(\mathrm{j}\omega)$ 求出相应的 $f(t)$ 的运算称为傅里叶反变换。由下式表示

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F(\mathrm{j}\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}\omega$$

称 $f(t)$ 为 $F(\mathrm{j}\omega)$ 的傅里叶反变换，将它简记作 $f(t)=\mathscr{F}^{-1}[F(\mathrm{j}\omega)]$。

$F(\mathrm{j}\omega)$ 一般是复数值，将它写作

$$F(\mathrm{j}\omega)=|F(\mathrm{j}\omega)|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi(\omega)}$$

称 $F(\mathrm{j}\omega)$ 为频谱密度函数或频谱函数；$|F(\mathrm{j}\omega)|$ 是 $F(\mathrm{j}\omega)$ 的模，称为 $f(t)$ 的振幅频谱；$\varphi(\omega)$ 是 $F(\mathrm{j}\omega)$ 的辐角，称为 $f(t)$ 的相角频谱。

对傅里叶变换可以作这样的解释：傅里叶变换将 $f(t)$ 分解为其频率连续分布在 ω 轴上的许多正弦形谐波，在宽度为 $\mathrm{d}\omega$ 的频带上谐波的复数振幅为 $\frac{1}{2\pi}F(\mathrm{j}\omega)$；傅里叶反变换则是将所有的谐波相加，即将 $\frac{1}{2\pi}F(\mathrm{j}\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}$ 对 ω 积分得到 $f(t)$。附表中列有常见信号的傅里叶变换的例子。由频谱函数 $F(\mathrm{j}\omega)$ 或振幅频谱 $|F(\mathrm{j}\omega)|$ 和相角频谱 $\varphi(\omega)$ 可以看出信号中各谐波成分的振幅和相位的分布情形。

用傅里叶变换分析线性电路或系统　集总的非时变线性电路或系统是以常系数线性微分方程来描述的。利用傅里叶变换和叠加定理，可以对这类电路（或系统）的零状态响应

作出分析。这里仅就一个激励所产生的一个变量的零状态响应问题说明这一方法。

假设有一激励 $u(t)$，$\mathscr{F}[u(t)]=U(\mathrm{j}\omega)$；响应为 $r(t)$，$\mathscr{F}[r(t)]=R(\mathrm{j}\omega)$。为求 $r(t)$，可以先求$R(\mathrm{j}\omega)$。对于线性非时变电路或系统，响应的频谱函数$R(\mathrm{j}\omega)$与激励的频谱函数$U(\mathrm{j}\omega)$之比被定义为电路或系统的频率传递函数，即 $H(\mathrm{j}\omega)=R(\mathrm{j}\omega)/U(\mathrm{j}\omega)$。假定频率传递函数 $H(\mathrm{j}\omega)$ 是已知的，则可由频率传递函数与激励的频谱函数的乘积求得响应的频谱函数即$R(\mathrm{j}\omega)=H(\mathrm{j}\omega)U(\mathrm{j}\omega)$。对 $R(\mathrm{j}\omega)$ 作傅里叶反变换即得

$$r(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R(\mathrm{j}\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\,\mathrm{d}\omega$$
$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}H(\mathrm{j}\omega)U(\mathrm{j}\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\,\mathrm{d}\omega$$

这就是所要求的响应 $r(t)$ 的零状态响应。

常见信号波形与其傅里叶变换

$f(t)$	波形图	频谱函数	频谱图
$U\mathrm{e}^{-\alpha t}\varepsilon(t)$ $(\alpha>0)$	$f(t)$, U, 0, t	$\dfrac{U}{\alpha+\mathrm{j}\omega}$	$\lvert F(\mathrm{j}\omega)\rvert$, U/α, 0, ω
$\begin{cases}U\left(\lvert t\rvert<\frac{\tau}{2}\right)\\0\left(\lvert t\rvert>\frac{\tau}{2}\right)\end{cases}$	$f(t)$, U, $-\frac{\tau}{2}$, 0, $\frac{\tau}{2}$	$\dfrac{2U}{\omega}\sin\dfrac{\omega\tau}{2}$	$\lvert F(\mathrm{j}\omega)\rvert$, $U\tau$, $-\frac{4\pi}{\tau}$, $-\frac{2\pi}{\tau}$, 0, $\frac{2\pi}{\tau}$, $\frac{4\pi}{\tau}$, ω
$\delta(t)$	$f(t)$, 1, 0, t	1	$\lvert F(\mathrm{j}\omega)\rvert$, 1, 0, ω

注：表中 $\varepsilon(t)$ 是单位阶跃函数，$\delta(t)$ 是单位冲激函数。

离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform，DFT）　用计算机作傅里叶正变换和反变换时，要把 $f(t)$ 和$F(\mathrm{j}\omega)$离散化，即用它们的有限个采样值作计算。令有限长序列 $x(n)$的长度为 N，即设 n 的值为 0，1，…，$(N-1)$。$x(n)$的离散傅里叶变换$X(k)$也是长度为 N 的序列。离散傅里叶正变换和反变换公式为

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}nk},\quad k=0,1,\cdots,N-1$$

$$x(n)=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}nk},\quad n=0,1,\cdots,N-1$$

将函数 $f(t)$ 离散化，即在时间区间 $[0,T]$ 内进行等间隔抽样。令抽样时间间隔 $T_s=T/N$，抽样得到序列 $x(n)$ 即为 $f(nT_s)$。令

$$\Omega=2\pi/T,\ 2\pi/N=\Omega T_s$$

则 T_s 和 N 满足一定条件下，$X(k)$ 可作为 $F(\mathrm{j}k\Omega)$ 的很好近似，即由 DFT 可有效计算连续信号的频谱。

快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform，FFT）　计算离散傅里叶变换的快速算法（FFT），由 J. W. 库利（J. W. Cooley）和 T. W. 图基（T. W. Turkey）在 1965 年最早提出，此后 FFT 算法的内容不断得到丰富。

设 $x=[x(0),x(1),\cdots,x(N-1)]^{\mathrm{T}}$ 是 N 维列向量，则

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$$

称为向量 $\boldsymbol{x}$ 的一维离散傅里叶变换（DFT）。其中 $\boldsymbol{A}$ 为 $N\times N$ 矩阵，元素 $\boldsymbol{A}_{ij}=\boldsymbol{W}_N^{ij}$，$0\leqslant i,j<N$。$W_N=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi/N}$ 是-1的 N 次根的主值，满足：（1）$W_N^N=1$，$W_N^{N/2}=-1$；（2）$W_N^{N+r}=W_N^r$，$W_N^{(N/2)+r}=-W_N^r$。FFT 利用 W_N 的性质进行代数变换，大大提高了 DFT 的计算效率。以 $N=2^M$ 为例，记 $\boldsymbol{X}=[X(0),X(1),\cdots,X(N-1)]^{\mathrm{T}}$，有

$$\begin{aligned}X(k)&=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)W_N^{nk}\\&=\sum_{r=0}^{(N/2)-1}x(2r)(W_N^2)^{rk}+W_N^k\sum_{r=0}^{(N/2)-1}x(2r+1)(W_N^2)^{rk}\\&=\sum_{r=0}^{(N/2)-1}x(2r)W_{N/2}^{rk}+W_N^k\sum_{r=0}^{(N/2)-1}x(2r+1)W_{N/2}^{rk}\\&=Y(k)+W_N^kZ(k),\quad k=0,1,\cdots,(N/2)-1\end{aligned}$$

式中 $Y(k)$ 和 $Z(k)$ 分别表示 $N/2$ 维向量 $[x(0),x(2),\cdots,x(N-2)]^{\mathrm{T}}$ 和 $[x(1),x(3),\cdots,x(N-1)]^{\mathrm{T}}$ 的 DFT。根据 W_N 的性质容易推知

$$X(k+N/2)=Y(k)-W_N^kZ(k),\ k=0,1,\cdots,(N/2)-1$$

以上推导过程将 N 维向量 DFT 的计算分解为分别计算两个 $N/2$ 维向量的 DFT，再进行 N 次乘法和加法。此分解过程可一直持续直到向量长度为 1。由此可知，若采用以上方式计算 $N=2^M$ 维向量的 DFT，则总的运算次数为 $T(N)=2T(N/2)+N=N\log_2 N$。当 N 不是 2 的整数幂时情况相仿。

直接计算 N 点 DFT 和逆变换（IDFT）各需要 N^2次乘法和 $N(N-1)$ 次加法，因此 FFT 算法比传统直接计算效率提高 $N/\log_2 N$ 倍。N 越大，效果越显著。如用计算机对卫星摄影的照片进行处理，对 10cm×10cm 的照片间隔 1μm 的点进行计算，在每秒 1 亿次计算机上需要 3 年时间，而 FFT 只要几十秒。

FFT 的发现被公认为数字信号处理发展史上的里程碑，标志数字信号处理学科的开端。FFT 算法在数字信号处理技术应用的各个领域，如谱分析、图像处理、数字通信等都发挥着重要作用。

dongtai dianlu shiyu fenxi

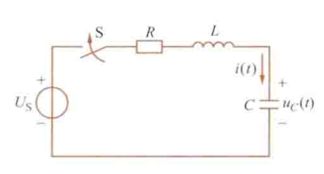
动态电路时域分析　（time domain analysis of dynamic circuit）　应用微分方程在时间域内分析动态电路。即用微分方程来描述电路的动态规律及其特性，研究电路变量在某个时间段内随时间而变化的规律。

在动态电路中，电压、电流、电荷、磁链这四种基本变量都是时间 t 的函数。根据元件特性和相关的电路定律，以基本变量列出表征动态电路特性的微分方程。如果电路中电感、电容和电阻都是线性非时变元件，则动态电路方程是常系数线性微分方程；如果电路中含有线性时变元件，则动态电路方程是变系数线性微分方程；如果电路中含有非线性元件，则动态电路方程是非线性微分方程。可使用数学中的微分方程求解上述线性或非线性微分方程。

微分方程的变量　通常选择电感的电流或磁链、电容的

电压或电荷。因为在不存在无穷大电源的情况下，它们在初始时刻不会发生数值上的突变。为了保证选择的变量是独立的，如果动态电路中存在由纯电容或由电容与独立电压源组成的回路、由纯电感或由电感与独立电流源组成的割集（见网络图论）。在列写微分方程之前可以先对电路进行等效变换，消去这一类回路和割集。

微分方程的形式　通常有两种形式：单变量微分方程和状态方程（见状态空间表达式）。单变量微分方程是以某一个基本变量列写的微分方程，方程的阶数等于动态电路中独立的电感和电容的个数。状态方程是以电感的电流或磁链、电容的电压或电荷为状态变量列写的一阶微分方程组，方程的维数等于状态变量的个数，即独立的电感和电容的个数。



电阻、电感与电容串联电路

典型的二阶线性动态电路见图示，其中电阻 R、电感 L 和电容 C 都是线性非时变元件。若选择电容的电压为变量，根据基尔霍夫定律和元件特性，可得到式（1）所示的微分方程

$$LC\frac{\mathrm{d}u_C^2}{\mathrm{d}t^2}+RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=U_S \tag{1}$$

如果同时选择电容的电压和电感的电流作为变量，根据基尔霍夫定律和元件特性，可得到式（2）所示的状态方程

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{C}i\\ \dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{1}{L}u_C-\dfrac{R}{L}i+\dfrac{1}{L}U_S\end{cases}$$

或

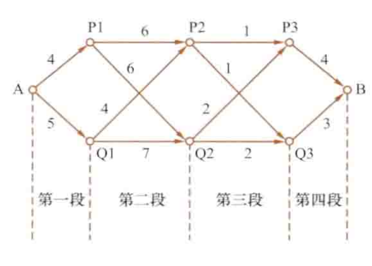
$$\begin{bmatrix}\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \dfrac{1}{C}\\ -\dfrac{1}{L} & -\dfrac{R}{L}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}u_C\\ i\end{pmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{1}{L}\end{bmatrix}U_S \tag{2}$$

微分方程的解答　根据微分方程变量的初始条件，使用数学中微分方程的解析方法或数值计算方法，可以获得方程的解答。对于线性动态电路，方程的解答是唯一的，并且可以表示为自由分量与强制分量之和或者表示为零输入响应与零状态响应之和。后一表示方法有利于简化问题分析或便于阐述物理意义。式（1）的特征方程为 $p^2+(R/L)p+1/(LC)=0$，求解后得特征根 p_1、p_2。p_1、p_2 值与 R、L 和 C 的数值有关。当特征根是一对实根时，$u_C(t)$ 的自由分量 $u'_C(t)=A\mathrm{e}^{p_1t}+B\mathrm{e}^{p_2t}$；当特征根是两个相等的实根 $p_1=p_2=p$ 时，$u_C(t)$ 的自由分量 $u'_C(t)=(A+Bt)\mathrm{e}^{pt}$；当特征根是一对共轭复根 $p_{1,2}=\alpha\pm\mathrm{j}\omega_d$ 时，$u_C(t)$ 的自由分量 $u'_C(t)=k\mathrm{e}^{\alpha t}\sin(\omega_d t+\theta)$。式中 A、B（$k$、$\theta$）为待定常数，由 $u_C(t)$ 的初始值 $u_C(0)$ 决定。$u_C(t)$ 的强制分量 $u''_C(t)=U_S$。$u_C(t)$ 全解的一般式为 $u_C(t)=u'_C(t)+u''_C(t)$。式（2）的求解方法可参见状态空间表达式和状态转移矩阵。如果动态电路的冲激响应是已知的，那么动态电路的零状态响应可以由冲激响应与激励函数的卷积积分计算出来。

dongtai guihua

动态规划　（dynamic programming，DP）　控制向量 $u(t)$ 受限制的情况下求解最优控制问题的一种方法。与极小值原理类似，它克服了古典变分法求解最优控制问题的局限性（见变分法）。动态规划法是在 20 世纪 50 年代初由美国数学家 R. E. 贝尔曼（R. E. Bellman）提出的。

多段（级）决策问题及最优性原理　最短行车时间问题是多段决策问题的一个例子。如图所示，从 A 行车至 B，全程分 4 段，中间站及各站间行车所需时间已分别标明。为使总的行车时间最短，在前三段分别要作一次决策。对于这样一个简单的问题，应用穷举法易知共有 8 种可能的行车路线，从而可找到最优路线。若段数增多，可能的行车路线数要急剧增加。



最短行车时间问题

与上述的穷举法不同，用动态规划法解上述多段决策问题的思路是：为最后找到由 A 到 B 的最优路线，先找出各站到终点 B 的最优路线。既然始自各站的最优路线都知道了，由 A 到 B 的最优路线也就找到了。

动态规划法的基础和核心是最优性原理：多段决策过程的最优策略具有这样的性质，不论初始状态和初始决策如何，其余的决策对于由初始决策所形成的状态来说，必定也是一个最优策略。简而言之，最优轨迹的后部，本身也是最优轨迹。

由动态规划法解得的上述行车问题的最优路线是 AQ1P2Q3B，它与穷举法结果一致，但其运算量小。决策过程的段数多时，两法差别显著。

动态规划法用于离散系统最优控制　系统状态方程为

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{u}(k)],\quad k=0,1,\cdots,N-1 \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{x}(k)$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}(k)$ 为 p 维控制向量。系统状态由 $\boldsymbol{x}(0)$ 作起点进行 N 步转移，总的性能指标为

$$\begin{aligned}J_N&=J[\boldsymbol{x}(0),\boldsymbol{u}(0)]+J[\boldsymbol{x}(1),\boldsymbol{u}(1)]\\&\quad+\cdots+J[\boldsymbol{x}(N-1),\boldsymbol{u}(N-1)]\\&=\sum_{k=0}^{N-1}J[\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{u}(k)]\end{aligned} \tag{2}$$

现在要求选择 $\{\boldsymbol{u}(0),\boldsymbol{u}(1),\cdots,\boldsymbol{u}(N-1)\}$ 使性能指标 J_N 达最小，这是 N 段决策问题。根据最优性原理，不论第一段控制向量 $\boldsymbol{u}(0)$ 怎样选定，余下的 $N-1$ 段过程，从 $\boldsymbol{u}(0)$ 产生的状态 $\boldsymbol{x}(1)=\boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(0),\ \boldsymbol{u}(0)]$ 作为起点，应是最优的 $N-1$ 段过程。从最后一段开始，由后向前逆向递推，求得整个问题的解。

动态规划法用于连续系统最优控制　系统状态方程为

$$\dot{x}=f(x,u,t),x(t_0)=x_0 \tag{3}$$

性能指标为

$$J=h[\boldsymbol{x}(t_f),t_f]+\int_{t_0}^{t_f}g(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

$\boldsymbol{x}(t_f)$ 为终端状态，求 $\boldsymbol{u}^*(t)$ 使 $J^*=\min J$。

根据最优性原理，可以导出下列方程

$$-\frac{\partial J^*}{\partial t}=\min_{u\in U}\left[g(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t)+\left(\frac{\partial J^*}{\partial \boldsymbol{x}}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t)\right] \tag{5}$$

求解使上式右端泛函最小的 $\boldsymbol{u}(t)$，它依赖于 $\boldsymbol{x}(t)$ 和 t，记为

$$\tilde{u}(t)=\tilde{u}\left(x,\frac{\partial J^*}{\partial x},t\right) \tag{6}$$

于是，式（5）又可表示为

$$-\frac{\partial J^*}{\partial t}=g(x,\tilde{u},t)+\left(\frac{\partial J^*}{\partial x}\right)^{\mathrm{T}}f(x,\tilde{u},t) \tag{7}$$

上式称为哈密顿-雅可比-贝尔曼方程。有些文献中，只以其中两人姓氏命名。

根据下式边界条件求解方程（7），求出 $J^*[x(t),t]$

$$J^*[x(t_f),t_f]=h[x(t_f),t_f] \tag{8}$$

再将解得的 $J^*[x(t),t]$ 代入式（6），就获得最优控制 $u^*[x(t),t]$，接着可求得 $x^*(t)$。

dongtai xitong bianshi

动态系统辨识 （dynamic system identification）

根据系统的输入输出时间函数来确定描述系统的数学模型，是现代控制理论的一个分支，亦称系统辨识。系统分析的主要问题是根据已知的系统数学模型，由输入时间函数确定输出信号。系统控制的主要问题是根据已知的系统数学模型，由要求的输出设计控制输入。系统辨识恰是来确定系统的数学模型。

建立系统的数学模型，通常有理论分析方法和试验方法两种。理论分析方法是根据系统内部已知的规律，用物理或化学的基本定律，直接推导出系统的数学模型。但有很多的复杂系统，其内部规律往往是不太清楚的，不能单靠用理论分析的方法来建立，必须用试验的方法，即系统辨识的方法才可能确定。

分类　按照系统先验知识的多少，辨识问题可分为黑箱问题和灰箱问题两类：①黑箱问题，也叫完全辨识问题。被辨识系统的基本特性是完全未知的，要辨识这类系统，尚无有效的办法。②灰箱问题，又叫不完全辨识问题。已知被辨识系统的一些基本特性，但不能确切地知道系统动态方程的阶次和方程式的系数。这样，系统辨识问题就简化成系统结构的辨识和参数估计了。

步骤　①根据系统的性质及控制方法，确定系统数学模型的表示形式；②选择合适的辨识信号；③观测系统的输入输出数据，并进行参数或状态估计；④进行模型的校核试验。如果不符合要求，则应另选一种模型，重复以上步骤，直至模型校核试验满意为止。

系统数学模型的表示形式　在动态系统的辨识中，最常用的数学模型表示形式有状态方程描述（包括微分方程组和差分方程组描述）和脉冲响应函数描述等。在前一种情况下，系统的动态特性可以用模型的参数来表征，故称为参数模型；后一种情况下，系统的动态特性是用响应曲线来表征的，称为非参数模型。

参数估计和状态估计　参数估计是数学模型的结构为已知的条件下，估计模型的未知参数。参数估计的方法很多，最基本的方法是最小二乘估计。估计准则是残差的平方和为最小。在时变系统的实时参数估计中，需要不断用新的观测数据来修改估计值，这称为递推最小二乘估计。当系统的模型用状态方程描述，而状态不能或难以测量时，需要对状态进行估计。对随机系统通常采用最小方差估计。估计准则是估计误差的方差为最小。当估计是观测的线性函数时，称为线性最小方差估计。此外，系统辨识的方法还有参数和状态估计的极大似然法和预报误差法、脉冲响应函数的相关分析法等。系统辨识还有模型结构的辨识、闭环系统辨识、非线性和多变量系统的辨识等。

dongtai xiangying

动态响应 （dynamic response）

控制系统对输入信号从初始状态到最终状态的响应过程。

经常采用的试验输入信号有阶跃函数、斜坡函数、抛物线函数、正弦函数和冲激函数等。这些信号都是简单的时间函数。利用它们可以分析控制系统。单位阶跃函数的表示式为

$$r(t)=\begin{cases}0,t<0\\1,t>0\end{cases}$$

单位斜坡函数的表示式为

$$r(t)=\begin{cases}0,t<0\\t,t>0\end{cases}$$

单位冲激函数的表示式为

$$p_\Delta(t)=\begin{cases}\dfrac{1}{\Delta},0<t<\Delta\\0,\text{其他}\end{cases}$$

即 $p_\Delta(t)$ 是这样一个矩形脉冲：其高度为 $1/\Delta$，宽度为 Δ，起点为 $t=0$。不论正参量 Δ 为何值，在曲线 $p_\Delta(t)$ 下面的面积总为 1。见图 1。

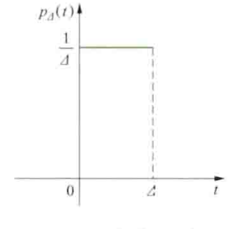


图 1　脉冲函数

单位冲激函数（狄拉克函数，δ 函数）$\delta(t)$ 可以表述为

$$\left.\begin{aligned}\delta(t)=0,t\neq 0\\ \int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\mathrm{d}t=1\end{aligned}\right\}\left(\begin{aligned}&\text{或者表述成普}\\&\text{通函数的形式}\end{aligned}\right)\delta(t)=\begin{cases}0,t\neq 0\\ \infty,t=0\end{cases}$$

单位冲激函数 $\delta(t)$ 是脉冲函数 $p_\Delta(t)$ 在 $\Delta\to 0$ 时的极限。

线性定常系统的传递函数为 $G(s)=Y(s)/X(s)$，在系统的输入为单位冲激函数时，$X(s)=1$，此时 $G(s)=Y(s)$，取拉普拉斯反变换，可求得单位冲激响应函数 $g(t)=y(t)=\mathscr{L}^{-1}[G(s)]$，它是系统所固有的。

图 2 所示为一控制系统对单位阶跃函数的动态响应过程，图中表明了延迟时间、上升时间、峰值时间、超调量、响应时间等性能指标。

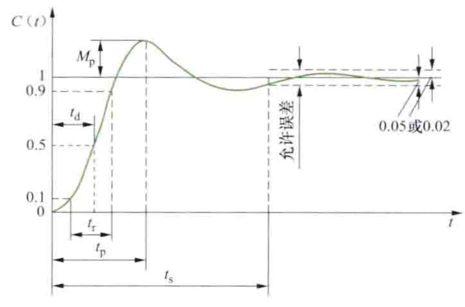


图 2　表示性能指标的单位阶跃响应曲线

（1）延迟时间 t_d：响应曲线第一次达到稳态值的一半所需时间。

（2）上升时间 t_r：响应曲线从稳态值的 10%上升到 90%，或从 5%上升到 95%，或从 0 上升到 100%所需的时间。

（3）峰值时间 t_p：响应曲线达到超调量的第一个峰值所需的时间。

（4）超调量 M_p：响应曲线的最大偏差值（响应曲线的最终稳态值作为1，以其作为基准）。若响应曲线的最终稳态值不为1，则百分比超调量为 $\frac{C(t_p)-C(\infty)}{C(\infty)}\times 100\%$。

（5）响应时间 t_s：系统受到扰动作用后从一个平衡状态到达新的平衡状态所经历的时间，也就是动态过程所经历的时间。一般，当输出量与其稳态值之差达到了而且不再超过一允许误差范围（通常取稳态值的5%或2%）时，认为动态过程结束。

一阶系统的动态响应　图3（a）所示为一阶系统的框图，图3（b）为其简化框图。系统的输入-输出关系为 $\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{1}{Ts+1}$。图3（c）所示为单位阶跃响应，其表达式为 $C(t)=1-e^{-\frac{t}{T}}$（$t\geqslant 0$）。图3（d）所示为单位斜坡响应，其表达式为 $C(t)=t-T+Te^{-\frac{t}{T}}$（$t\geqslant 0$）。图3（e）所示为单位冲激响应，其表达式为 $C(t)=\frac{t}{T}e^{-\frac{t}{T}}$（$t\geqslant 0$）。

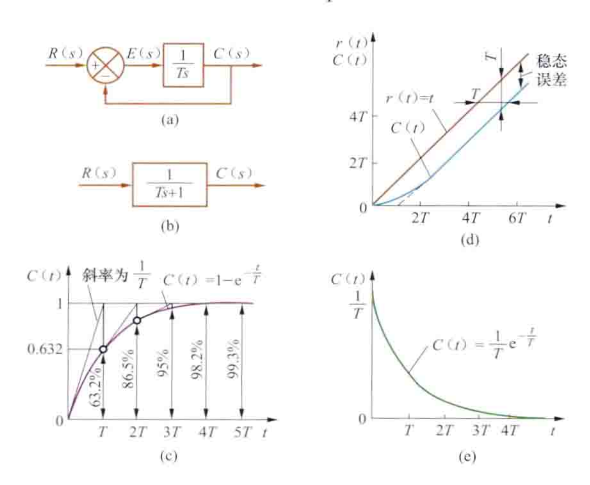


图3　一阶系统及其动态响应

（a）框图；（b）简化框图；（c）单位阶跃响应；（d）单位斜坡响应；（e）单位冲激响应

二阶系统的动态响应　图4（a）所示为二阶系统的框图。系统的输入-输出关系亦即闭环传递函数为 $\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$，式中 ζ 为系统的阻尼比，ω_n 为无阻尼自然频率。有以下几种情况。

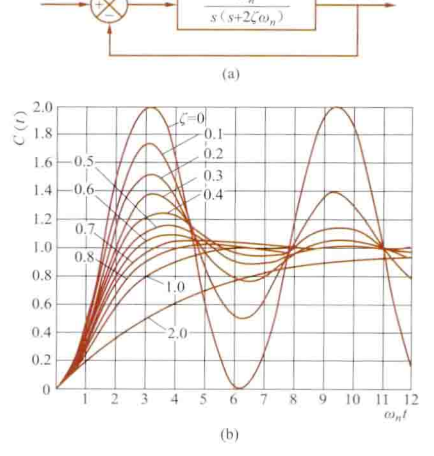


图4　二阶系统及其动态响应（一）

（a）框图；（b）单位阶跃响应

（1）欠阻尼情况（$0<\zeta<1$）：这是衰减振荡。

（2）临界阻尼情况（$\zeta=1$）：动态响应是非周期的。

（3）过阻尼情况（$\zeta>1$）：动态响应是非周期的。

（4）无阻尼情况（$\zeta=0$）：这是不衰减振荡。

（5）不稳定情况（$\zeta<0$）：振幅渐增的振荡。

图4（b）所示为二阶系统的单位阶跃响应，图4（c）所示为单位冲激响应。

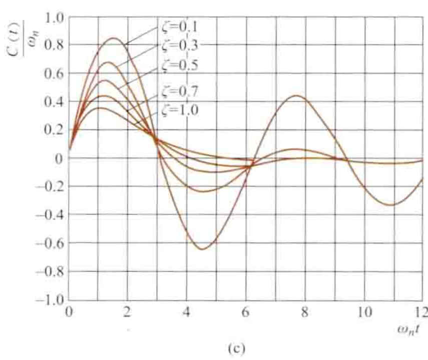


图4　二阶系统及其动态响应（二）

（c）单位冲激响应

高阶系统的动态响应　经过推导和整理，可以得出，高阶系统的响应是由若干个一阶系统和二阶系统的响应函数总加而得的。

如果一个稳定系统的极点和零点的分布符合如下的情况：左半复平面上离虚轴最近的是一对共轭复极点，它们的附近没有零点；系统的其他极点，有的恰有邻近的零点，有的又在上述这对极点左方很远的地方，就可以把这对离虚轴最近的极点视为主导极点，并把其他极点和零点的作用都略去不计。这样，就把高阶系统近似化为一个二阶系统，其动态特性主要就由这一对主导极点决定。

duanlu

短路　（short circuit）　电路中在正常情况下处于不同电压下的两个或多个点之间，通过比较低的电阻或阻抗偶然或有意形成的连接。在短路状态下，该支路两端的电压近于零（理想情况下为零），支路中的电流值基本上由外部电路参数所决定。

在电力系统中，短路也常表示一种非正常的工作状态。在运行中相与相之间或相与地之间发生的非正常连接，或由于设备绝缘击穿而造成的短路事故，都会引起很大的短路电流，使导线或设备损坏。因此，短路事故是应该力求避免的。

duichen fenliangfa

对称分量法　（method of symmetrical components）　将不对称的三个相量分解为正序、负序、零序对称分量组，用来计算线性对称三相电路不对称运行状态的一种方法。这种方法常用来计算故障情况下含有旋转电机的不对称三相电路。

正序、负序和零序对称分量组　以三相电压为例，对称分量组包括下列三种类型。

（1）正序对称分量组 $\underline{U}_A^+$、$\underline{U}_B^+$、$\underline{U}_C^+$。三者大小相等，相位上 $\underline{U}_B^+$ 滞后 $\underline{U}_A^+$ 120°，$\underline{U}_C^+$ 滞后 $\underline{U}_B^+$ 120°，见图1（a）。可记为 $\underline{U}_B^+=\alpha^2\underline{U}_A^+$，$\underline{U}_C^+=\alpha\underline{U}_A^+$（$\alpha=\angle 120°=\angle -240°$，$\alpha^2=\angle 240°=\angle -120°$）。

（2）负序对称分量组 $\underline{U}_A^-$、$\underline{U}_B^-$、$\underline{U}_C^-$。三者大小相等，相位上 $\underline{U}_B^-$ 超前 $\underline{U}_A^-$ 120°，$\underline{U}_C^-$ 超前 $\underline{U}_B^-$ 120°，见图1（b）。可记为 $\underline{U}_B^-=\alpha\underline{U}_A^-$，$\underline{U}_C^-=\alpha^2\underline{U}_A^-$。

（3）零序对称分量组 $\underline{U}_A^0$、$\underline{U}_B^0$、$\underline{U}_C^0$。三者大小相等，相位

上同相，见图1（c）。可记为$\dot{U}_A^0 = \dot{U}_B^0 = \dot{U}_C^0$。

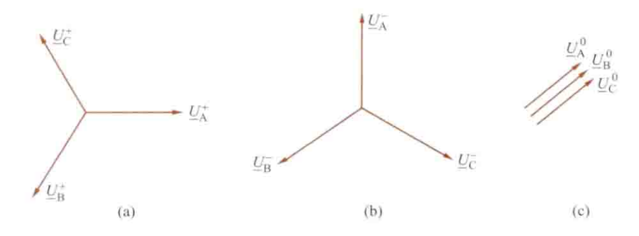


图1　对称分量组
（a）正序对称分量组；（b）负序对称分量组；（c）零序对称分量组

不对称三相相量的正序、负序、零序对称分量组　若将图1中每相的三个对称分量相加，即

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_A^+ + \dot{U}_A^- + \dot{U}_A^0 \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_B^+ + \dot{U}_B^- + \dot{U}_B^0 = \alpha^2\dot{U}_A^+ + \alpha\dot{U}_A^- + \dot{U}_A^0 \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_C^+ + \dot{U}_C^- + \dot{U}_C^0 = \alpha\dot{U}_A^+ + \alpha^2\dot{U}_A^- + \dot{U}_A^0 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

则$\dot{U}_A$、$\dot{U}_B$、$\dot{U}_C$是一组不对称的三相电压，见图2。反之，任一组三相不对称电压$\dot{U}_A$、$\dot{U}_B$、$\dot{U}_C$可理解为是它们的正序、负序和零序对称分量组的合成。若已知不对称三相电压$\dot{U}_A$、$\dot{U}_B$和$\dot{U}_C$，并以$\dot{U}_A^+$、$\dot{U}_A^-$、$\dot{U}_A^0$代表三个对称分量组的基本相量，则可求得

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_A^+ &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha\dot{U}_B + \alpha^2\dot{U}_C) \\ \dot{U}_A^- &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha^2\dot{U}_B + \alpha\dot{U}_C) \\ \dot{U}_A^0 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

三相三线制中由于没有零序电流的返回通路，即使存在电压的零序分量，线电流中也不会含有零序分量。

用对称分量法计算不对称三相电路　分不对称三相电源作用于对称三相负载和对称三相电源作用于不对称三相负载两种情况。

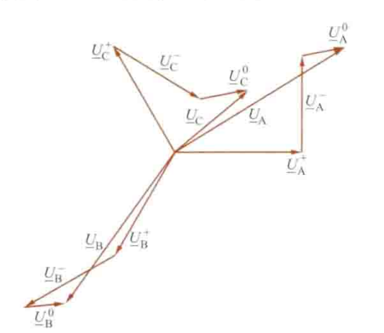


图2　不对称三相电压及对称分量

不对称三相电源作用于对称三相负载　以有中线的Y-Y三相电路为例，见图3（a），其求解步骤如下：

（1）将不对称三相电源相电压分解为正序、负序、零序对称分量组，按式（2）可求得其基本相量$\dot{U}_A^+$、$\dot{U}_A^-$、$\dot{U}_A^0$。

（2）利用叠加定理，分别计算电源相电压的正序、负序、零序对称分量组单独作用下的三相电路，见图3（b）、（c）、（d）。就每个对称分量的三相电路而言，电路是对称的（见对称三相电路）。可方便地利用对称条件求出线电流和相电压的各对称分量的基本相量

$$\dot{I}_A^+ = \dot{U}_A^+ / Z^+,\ \dot{I}_A^- = \dot{U}_A^- / Z^-$$

$$\dot{I}_A^0 = \dot{U}_A^0 / (Z^0 + 3Z_N)$$

$$\dot{U}_{PA}^+ = \dot{I}_A^+ Z^+,\ \dot{U}_{PA}^- = \dot{I}_A^- Z^-$$

$$\dot{U}_{PA}^0 = \dot{I}_A^0 Z^0$$

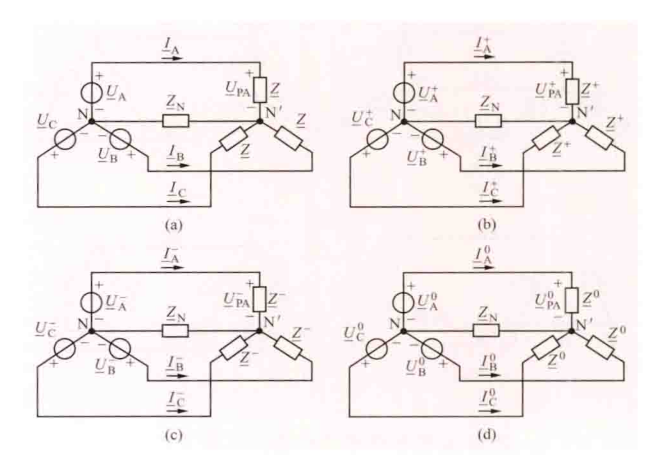


图3　Y-Y三相电路及其三个对称分量的三相对称电路
（a）Y-Y三相电路；（b）正序对称分量的三相电路；（c）负序对称分量的三相电路；（d）零序对称分量的三相电路

式中Z_N是中线阻抗；Z^+、Z^-、Z^0分别是对称三相负载的正序、负序和零序阻抗，随三相负载的类型而异。在正序、负序和零序三相电流作用下，它所反映出的阻抗可能是互不相等的。对三相异步电动机：$Z^+ \neq Z^- \neq Z^0$。它们可以通过试验来确定。

（3）将求出的各对称分量合成，求出待求的三相不对称电流、电压。其中

$$\dot{I}_A = \dot{I}_A^+ + \dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_B^+ + \dot{I}_B^- + \dot{I}_B^0 = \alpha^2\dot{I}_A^+ + \alpha\dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_C^+ + \dot{I}_C^- + \dot{I}_C^0 = \alpha\dot{I}_A^+ + \alpha^2\dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

$$\dot{U}_{PA} = \dot{U}_{PA}^+ + \dot{U}_{PA}^- + \dot{U}_{PA}^0$$

$$\dot{U}_{PB} = \dot{U}_{PB}^+ + \dot{U}_{PB}^- + \dot{U}_{PB}^0 = \alpha^2\dot{U}_{PA}^+ + \alpha\dot{U}_{PA}^- + \dot{U}_{PA}^0$$

$$\dot{U}_{PC} = \dot{U}_{PC}^+ + \dot{U}_{PC}^- + \dot{U}_{PC}^0 = \alpha\dot{U}_{PA}^+ + \alpha^2\dot{U}_{PA}^- + \dot{U}_{PA}^0$$

对称三相电源作用于不对称三相负载　在对称三相电路中，如三相负载发生故障可引起三相负载的不对称。在这种情况下，也可设法把这类电路转化为等效的不对称三相电源作用于对称三相负载的电路，然后利用上述的对称分量法来求解。对称分量法也可以扩展用于线性m相不对称电路（见多相电源）。

duichen sanxiang dianlu

对称三相电路（symmetrical three-phase circuit）

由对称三相电源和对称三相负载组成的电路。电力系统在正常工作时，可近似认为是对称三相电路。

分类　三相电源可接成星形或三角形，三相负载也可接成星形或三角形。所以三相电路有如图所示的四种基本连接方式：星形电源-星形负载（Y-Y）；星形电源-三角形负载（Y-△）；三角形电源-星形负载（△-Y）；三角形电源-三角形负载（△-△）。后三种的电源和负载之间只可由三根引线相连，这种连接称为三相三线制。但Y-Y连接方式可采用三相三线制和三相四线制。当电源中性点（见三相电源）和负载中性点（见三相负载）之间用导线连接时，连接两中性点的导线称为中线，有中线的三相电路称三相四线制电路。

电路分析　在对称三相电路中，若电源的相电压为正

对称三相电路的四种基本连接方式

(a) Y-Y；(b) Y-△；(c) △-Y；(d) △-△

序对称组（见对称分量法），则所有的三相线电压和相电压、三相线电流和相电流均为正序对称组。分析这种电路只要计算一相（例如 A 相的电压、电流），其他相的电压、电流可以按正序对称组的特点直接写出。以Y-Y有中线的三相电路为例，电路如图（a）所示。A 相电流为

$$\underline{I}_{\rm A}=\frac{\underline{U}_{\rm A}}{\underline{Z}}$$

B 相和 C 相电流与 A 相电流大小相等，相位互差 120°，即

$$\underline{I}_{\rm B}=\alpha^2\underline{I}_{\rm A},\ \underline{I}_{\rm C}=\alpha\underline{I}_{\rm A}$$

式中 α、α^2 为复数算子，$\alpha=1\angle 120^\circ$，$\alpha^2=1\angle 240^\circ=1\angle -120^\circ$。

中线电流 $\underline{I}_{\rm N}=\underline{I}_{\rm A}+\underline{I}_{\rm B}+\underline{I}_{\rm C}=0$，即中线电流为零，中线形同虚设，如果去掉中线（Y-Y无中线），电路工作情况不受影响。因此，Y-Y接法在三相对称时采用三线制，只是在三相不对称时才采用有中线的三相四线制（见不对称三相电路）。

对其他三种基本接法的对称三相电路，可以采用类似的方法进行分析。一种行之有效的方法是采用Y-△等效变换的方法来简化电路结构。对于三相负载，可把对称三角形负载转换为等效对称星形负载（或反之）；其变换关系为 $\underline{Z}_{(\rm Y)}=\frac{1}{3}\underline{Z}_{(\triangle)}$。这里，$\underline{Z}_{(\triangle)}$ 和 $\underline{Z}_{(\rm Y)}$ 分别为三角形负载阻抗和星形负载阻抗（见星接阻抗和三角接阻抗的变换）。对于三相电源，可将对称三角形电源转换成对称星形电源（或反之）；其变换关系为 $\underline{U}_{\rm A(Y)}=\frac{1}{\sqrt{3}}\underline{U}_{\rm A(\triangle)}\angle -30^\circ$（见线电压），$\underline{U}_{\rm B(Y)}=\alpha^2\underline{U}_{\rm A(Y)}$ 和 $\underline{U}_{\rm C(Y)}=\alpha\underline{U}_{\rm A(Y)}$。这里 $\underline{U}_{\rm A(\triangle)}$ 为对称三角形电源的 A 相电压；$\underline{U}_{\rm A(Y)}$、$\underline{U}_{\rm B(Y)}$、$\underline{U}_{\rm C(Y)}$ 分别是等效对称星形电源的 A 相、B 相和 C 相的电压。

利用上述方法，可将图（b）、（c）、（d）中的各种接法分别转换为等效的Y-Y接法，然后求出其线电流 $\underline{I}_{\rm A}$、$\underline{I}_{\rm B}$、$\underline{I}_{\rm C}$。

对于三相对称负序电路可采用类似方法进行分析。

dui'ou yuanli

对偶原理

（principle of duality） 一个控制系统 S1 的可控性（可观测性）检验与其对偶系统 S2 的可观测性（可控性）检验完全相同。

设系统 S1 的动态方程为 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{Ax}+\boldsymbol{Bu}$，$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{Cx}$；S2 的动态方程为 $\dot{\boldsymbol{z}}=\boldsymbol{A}^{\rm T}\boldsymbol{z}+\boldsymbol{C}^{\rm T}\boldsymbol{v}$，$\boldsymbol{w}=\boldsymbol{B}^{\rm T}\boldsymbol{z}$。式中向量 $\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{z}$ 为 n 维，$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{w}$ 为 p 维，$\boldsymbol{y}$、$\boldsymbol{v}$ 为 q 维，矩阵 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 为相应的维数，则称系统 S1 与 S2 是互为对偶的系统。

容易验证：系统 S1 的可控性矩阵

$$[\boldsymbol{B}\ \vdots\ \boldsymbol{AB}\ \vdots\ \cdots\ \vdots\ \boldsymbol{A}^{n-1}\boldsymbol{B}]$$

的秩与系统 S2 的可观测性矩阵

$$[(\boldsymbol{B}^{\rm T})^{\rm T}\ \vdots\ (\boldsymbol{B}^{\rm T}\boldsymbol{A}^{\rm T})^{\rm T}\ \vdots\ \cdots\ \vdots\ (\boldsymbol{B}^{\rm T}(\boldsymbol{A}^{\rm T})^{n-1})^{\rm T}]^{\rm T}$$

的秩是相同的；系统 S1 的可观测性矩阵

$$[\boldsymbol{C}^{\rm T}\ \vdots\ \boldsymbol{A}^{\rm T}\boldsymbol{C}^{\rm T}\ \vdots\ \cdots\ \vdots\ (\boldsymbol{A}^{\rm T})^{n-1}\boldsymbol{C}^{\rm T}]^{\rm T}$$

的秩与系统 S2 的可控性矩阵

$$[\boldsymbol{C}^{\rm T}\ \vdots\ \boldsymbol{A}^{\rm T}\boldsymbol{C}^{\rm T}\ \vdots\ \cdots\ \vdots\ (\boldsymbol{A}^{\rm T})^{n-1}\boldsymbol{C}^{\rm T}]$$

的秩是相同的。

对偶原理对时变系统、离散系统同样适用。

duishu fangdaqi

对数放大器

（logarithmic amplifier） 把集成运算放大器连接成能实现输出电压是输入电压的对数函数的放大电路。它广泛用于控制和检测系统中，例如要实现两个信号的乘积，可以分别取它们的对数，相加后再取其反对数；又如当输入信号的变动范围很大时，应用对数放大器，它的输出电压的变动范围就可以相对压缩。

工作原理 利用半导体 PN 结的指数型伏安特性，将晶体管 V 接入运放 N 的反馈支路，且晶体管的基极接地，构成如图 1 所示的对数运算电路。设运放 N 为理想元件，按“虚短”和“虚断”的概念（见加法电路），由图 1 可知，晶体管的 $u_{\rm CB}\approx 0$，$i_{\rm I}=u_{\rm I}/R=i_{\rm C}$，集电极电流与发射结电压之间的关系为 $i_{\rm C}\approx I_{\rm S}\exp(u_{\rm BE}/U_{\rm T})$。这里，$I_{\rm S}$ 为发射结反向饱和电流，$U_{\rm T}$ 为 PN 结的热电压，$U_{\rm T}=kT/q$（其中 k 为波耳兹曼常数，T 为绝对温度，q 为电子的电量，当 $T=300{\rm K}$ 时，$U_{\rm T}\approx 26{\rm mV}$），$u_{\rm BE}=-u_{\rm O}$，则有 $u_{\rm I}/R\approx I_{\rm S}\exp(u_{\rm BE}/U_{\rm T})=I_{\rm S}\exp(-u_{\rm O}/U_{\rm T})$，两边取对数可得 $u_{\rm O}\approx -U_{\rm T}\ln[u_{\rm I}/(I_{\rm S}R)]$。可见，电路的输出电压与输入电压的对数成正比。同时，运算关系与 $U_{\rm T}$ 和 $I_{\rm S}$ 有关，因而运算精度受温度的影响。设计实用电路时，要采取一定措施减少 $U_{\rm T}$ 和 $I_{\rm S}$ 对运算精度的影响。例如，在集成对数放大器（型号 ICL8048）中，利用差动放大电路的原理设计了温度补偿电路，外加热敏电阻可改善温度特性。

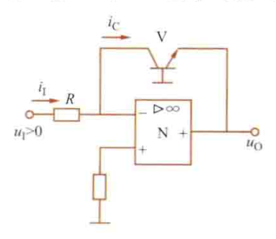


图 1 基本的对数放大器

反对数放大器 因反对数放大器是对数放大器的逆运算，所以，只要将图 1 中的晶体管和电阻 R 互相换位即可。电路如图 2 所示。因反相端为虚地，故 $i_{\rm I}=i_{\rm C}\approx I_{\rm S}\exp(u_{\rm I}/U_{\rm T})=i_{\rm f}$，输出电压 $u_{\rm O}=-i_{\rm f}R=-I_{\rm S}R\exp(u_{\rm I}/U_{\rm T})$，即 $u_{\rm O}/(I_{\rm S}R)=-\exp(u_{\rm I}/U_{\rm T})$，两边取自然对数 $\ln[u_{\rm O}/(I_{\rm S}R)]=-u_{\rm I}/U_{\rm T}$，故得 $u_{\rm O}=-I_{\rm S}R\ln^{-1}(u_{\rm I}/U_{\rm T})$。与对数放大电路类似，该电路的运算精度也受温度的影响比较大，设计实用电路时，需要加入温度补偿电路才行。在集成反对数放大器（型号

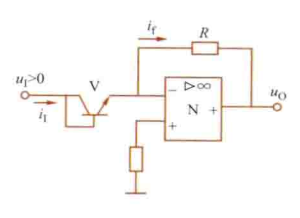


图 2 反对数（指数）放大器原理图

ICL8049）中，利用差动放大电路的原理设计了温度补偿电路，外加热敏电阻可减少温度对运算精度的影响。

duofeilü diannengbiao

多费率电能表

（multi rate kWhmeter） 测量每天各限定时段内的电能，以便按不同费率计价的电能表，又称分时计度电能表或复费率电能表。传统的多费率电能表（见图）即在感应系电能表基础上加装若干个计度器制成，其各计度器分别在规定的时段内工作，计量出不同时段的电能，对应不同的电价。采用多费率电能表可将高峰和低谷用电分开计量，分别计费，为以经济手段调节用电负荷提供支撑。



多费率（多功能）三相电能表

静止式多费率功能的电能表将逐渐取代传统的感应系多费率电能表。

duogongneng diannengbiao

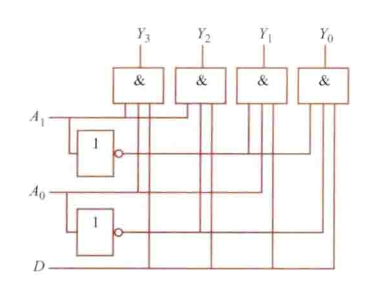
多功能电能表

（multifunctional kWhmeter） 见静止式电能表。

duolu fenpeiqi

多路分配器

（demultiplexer，DMUX） 根据输入控制信号的不同状态，将需要传送的信号送到选定的输出端去的组合逻辑电路。这里控制信号又称地址信号。多路分配器广泛用于计算机及控制电路中。



四线多路分配器的逻辑图

图示是一个四线多路分配器的逻辑图，其中 A_1、A_0 是输入控制端，D 是数据输入端，Y_3、Y_2、Y_1、Y_0 是四个输出端。由电路功能表可见，通过给定 A_1、A_0 的不同状态，即可把 D 端的输入数据送到选定的一根输出线上去。

如果把 D 端作为附加控制端使用，并令 $D=1$，则 $Y_3 \sim Y_0$ 将只取决于 A_1、A_0 的状态，此时电路就是一个带附加控制端的2线-4线译码器（见译码器）。因此，也把带附加控制端的译码器叫作多路分配器。

电路功能表

A_1	A_0	Y_3	Y_2	Y_1	Y_0
0	0	0	0	0	D
0	1	0	0	D	0
1	0	0	D	0	0
1	1	D	0	0	0

duolu xuanzeqi

多路选择器

（multiplexer，MUX） 根据输入控制信号的不同状态，从一组输入信号中选出其中一个并将其送至输出端的组合逻辑电路，又称数据选择器。

图1是“四选一”多路选择器的逻辑图。其中 D_3、D_2、D_1、D_0 是四个输入数据，Y 为输出，A_1、A_0 为输入控制信号（亦称地址信号）。由电路功能表可见，通过给定 A_1、A_0 的不同状态，即可从 $D_3 \sim D_0$ 这四个数据中选出其中一个，并使之出现在输出端上。

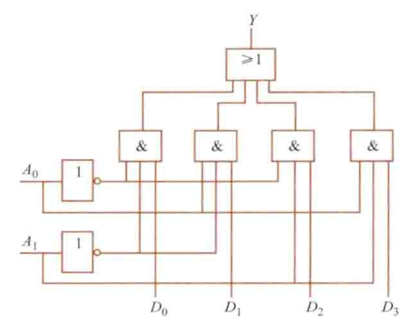


图1 “四选一”多路选择器的逻辑图

多路选择器不仅可用于数据选择，还可用于实现任意的逻辑函数。由表可知，若将 Y 写成 A_1、A_0 及 $D_3 \sim D_0$ 的逻辑函数时，则得

电路功能表

A_1	A_0	Y
0	0	D_0
0	1	D_1
1	0	D_2
1	1	D_3

$$Y = \overline{A_1}\,\overline{A_0}D_0 + \overline{A_1}A_0D_1 + A_1\overline{A_0}D_2 + A_1A_0D_3$$

显然，n 个地址输入可选择 2^n 路输入数据，它的逻辑表达式可表示为

$$Y = \sum_{i=0}^{2^n-1} m_i D_i$$

如果将地址信号 A_1、A_0 等视为输入逻辑变量，多路选择器的每一个数据输入 D_i 对应一个地址变量的最小项 m_i，因此可方便地实现单输出逻辑函数。

例如，为了得到逻辑函数 $Y = \overline{A_0}\,\overline{A_1}\,\overline{A_2} + A_0\overline{A_1}A_2 + A_0A_1A_2$，将变量 A_1、A_0 作为地址信号，对照“四选一”多路选择器的逻辑表达式，则只需令 $D_0 = \overline{A_2}$、$D_1 = A_2$、$D_2 = 0$、$D_3 = A_2$ 即可。电路的具体连接方法见图2。

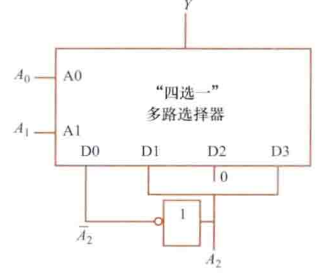


图2 用多路选择器产生逻辑函数的例子

duomeiti jishu

多媒体技术

（multimedia technology） 使用计算机综合处理数字化的文本、图形、图像、声音、动画、视频等多种媒体信息的技术。多媒体技术的特点是多样性、实时性、集成性和交互性。多媒体技术提高了信息的表示和处理能力，已经在教育与培训、娱乐、电子出版物、商业广告、办公自动化和计算机会议系统、信息咨询系统、数字化图书馆等领域中得到了广泛应用。

发展历程 最早起源于1984年美国Apple公司研制的Macintosh计算机，它首次引入位图概念和用图符作为交互界面的技术。1986年，Philips公司和Sony公司联合研制并推出交互式紧凑光盘（compact disc interactive，CD-I），它为存储表示声音、文字、图形、音频和视频等高质量的数字化媒体提供了有效的手段，从而为多媒体技术的发展奠定了基础。同时，多媒体相关技术标准的制定工作也推动了多媒体技术的发展。

研究内容 ①多媒体计算机系统的软、硬件平台；②数

字音频和视频技术；③多媒体通信技术；④多媒体信息特征与建模；⑤多媒体的种类、性质及其相互关系；⑥多媒体信息的组织与管理；⑦虚拟现实技术。⑧多媒体应用开发。

超文本与超媒体　超文本是包含指向其他文档或文档元素的链接的电子文档。传统的文本是以线性方式组织的，而超文本是以非线性方式组织的。超文本主要是以文字的形式表示信息，而超媒体（hypermedia）不仅可以包含文字，而且还可以包含图形、图像、动画、声音和视频。万维网是超媒体应用的一个最好的例子。

跨媒体　随着互联网及各种信息处理技术的应用范围越来越大，为了发挥不同媒体之间的协同效应，力求将整合后的信息内容通过各种媒介及时、快速地向最大范围的受众发布，新闻、出版领域率先提出了“跨媒体”的概念。所谓“跨媒体”就是建立在多媒体技术的基础上，通过最大限度地获取不同媒体之间的类似性、关联性和互补性，使得多种媒体信息的识别、聚类、存储、检索和利用更加充分和有效，并使媒体信息的发现重构、共生新用成为可能，从而达到各种媒体信息的融合。

多媒体技术及其应用正在向深层次发展。下一代用户界面是基于内容的多媒体信息检索，保证服务质量的多媒体全光通信网，基于高速互联网的新一代分布式多媒体信息系统等，新的技术、新的应用、新的系统将不断涌现。

duomeiti ruanjian

多媒体软件

（multimedia software）　与多媒体有关的计算机软件。多媒体软件按其功能分为多媒体驱动软件、多媒体操作系统、多媒体素材编辑软件、多媒体著作工具、多媒体应用软件和多媒体数据库等类别。

多媒体驱动软件　多媒体软件中直接和硬件相关联的部分。它完成设备的初始化，各种设备的操作以及设备的打开和关闭，基于硬件的压缩解压和图像快速变换等基本功能。

多媒体操作系统　用于支持多媒体的输入/输出及相应的软件接口。它具有实时任务调度、多媒体数据转换和同步控制、对仪器设备的驱动和控制以及图形用户界面管理等功能，如 Windows XP、Windows 7 等。

多媒体素材编辑软件　用于采集、整编和编辑各种媒体数据，如图像处理软件 Photoshop、声音处理软件 CoolEdit、视频编辑软件 Premiere 和动画制作软件 Flash 等。

多媒体著作工具　一种高级的多媒体应用程序开发平台。它能统一地编辑、管理多媒体数据，将多媒体数据连接成完整的多媒体应用程序。常见的多媒体著作工具有基于图标/流程图、卡片和语言的著作工具三种类型，如 PowerPoint，ToolBook，Authorware，Director，方正奥思多媒体创作工具等。

多媒体应用软件　在多媒体平台上设计开发的面向应用的软件系统。它包括可供用户二次开发的软件和直接面向最终用户的专用软件。多媒体应用软件开发的一般过程：①需求定义；②脚本编写；③多媒体信息数据准备；④创作设计；⑤测试维护。

多媒体数据库　它储存文本、图形、图像、动画、声音、视频图像等多种媒体信息。设计开发多媒体数据库主要采用面向对象技术。研究多媒体数据库主要涉及数据模型、存储、压缩和解压、查询、建立索引机制、信息的统一、信息显示和分布计算等问题。

duomeiti yingjian

多媒体硬件

（multimedia hardware）　用来采集、存储、处理和输出多媒体信息的部件和装置。某些硬件配置在多媒体计算机机箱内，而另外一些则与多媒体计算机连接在一起使用。图 1 所示为电脑词典。多媒体硬件是多媒体系统的物质基础，结合多媒体软件可组成完整的多媒体信息处理系统。



图 1　电脑词典

常见多媒体硬件有多媒体存储设备、输入/输出设备、数字视频交互系统、视频卡、音频卡和通信设备等。

（1）多媒体存储设备。包括磁存储设备、光存储设备以及网络存储设备等。

（2）输入/输出设备。包括扫描仪（见图 2）、数码照相机（见图 3）、数码摄像机、电视摄像机、显示设备、触摸屏、打印机等。



图 2　扫描仪

（3）数字视频交互系统（digital video interactive，DVI）。实现对数字的视频、音频、静止图像、计算机图形的信息综合，具有全数字化、信息压缩和合成图形等功能。



正面



背面

图 3　数码照相机

（4）视频卡。把输入的视频信号采集压缩，以视频文件的形式存储在硬盘中，解压后可重新播放。压缩和解压应以实时的方式进行，并遵循 JPEG 或 MPEG 系列标准。

（5）音频卡。处理音频信号的个人计算机插卡。一般具有立体声合成、模拟混音、立体声方式的 A/D 和 D/A 转换、数字信号处理、CD-ROM 接口和输出功率放大等功能。

（6）通信设备。通过调制解调器把多媒体计算机与网络连接在一起，以实现多媒体信息通信。

duoxiang dianyuan

多相电源

（polyphase sources）　能够同时提供 m 个频率相同而初相位互异的电压的电源。m 为电源的相数，当 $m=3$ 时就是三相电源。

m 相电源的连接方式（$m\geqslant 3$）　有星形联结和多角形

联结两种。

星形联结 各相线圈的始端分别与端线相接，它们的末端则连成一个公共端 N 的一种连接方式。N 叫作 m 相电源的中性点。

多角形联结 每一相线圈的始端与紧邻的前一相线圈的末端相连后再接到端线的一种连接方式。$m=3$ 时，它就变成三角形联结。

相序 电源的 m 相相电压通过具有相同斜率的同一值的次序。它可以是正序，也可以是负序。

对称的 m 相电源 m（$m \geqslant 3$）个相电压同时满足：①有效值一样；②每紧邻两相的相位差都是 $360°/m$。①和②是任何对称 m 相的相电压、线电压、相电流和线电流必须满足的两个条件。

星形联结时线电压（线电流）和相电压（相电流）间的关系 线电流等于对应的相电流。若 m 相线电压和 m 相相电压均为正序（负序）对称组，则相邻两线间的线电压的有效值为相电压有效值的 $2\sin\frac{\pi}{m}$ 倍。

多角形联结时线电压（线电流）和相电压（相电流）间的关系 相邻两线间的线电压等于相电压。若 m 相线电流和 m 相相电流均为正序（负序）对称组，则线电流的有效值为相电流有效值的 $2\sin\frac{\pi}{m}$ 倍。

多相制 由多相电源和多相负载连接而成的多相电路。它有对称和不对称多相制之分（见对称三相电路）。当 $m=1$ 时，它就是单相制。与单相制比较，多相制的优点为：①在相同的输电条件（电压、输电距离和输电效率都一样）下，输送一定的负载功率，多相制的端线用铜量少（三相制节省 25%）；②在相同的容量下，多相电机比单相电机尺寸小，材料省；③对称多相制下，多相电机的瞬时功率与时间无关，电机运行平稳；④对称多相电流可以产生旋转磁场，使所设计的多相电动机结构较简单，便于维修等。

在电力系统中，广泛使用三相制。为了提高传输效益，已注意使用 $m>3$ 的多相制，特别是六相制、十二相制，它们可以提高端线的热加载容量和传输效率，降低相间绝缘水平以及端线受到的应力。

通常，二相电源（它的两相绕组在空间间隔 90°）多用于低压反馈系统中，用来驱动作控制用的二相伺服电机；六相和十二相以及更多相的多相电源则常用在电力电子整流系统中，为了向负载提供一个低纹波的直流电源。



EBCDIC ma

EBCDIC 码 (EBCDIC code) 见代码。

erduankou

二端口 (2-port) 有两个分离端口的电网络。满足从一个端子进入网络的电流等于从另一个端子出来的电流的两个端子组成一个端口。二端口的图形如图1所示。图中，端子对1和1′构成一个端口，端口电流是i_1；端子对2和2′构成另一个端口，端口电流是i_2。u_1、u_2分别是两个端口电压。如果在11′端口的一个端子和22′端口的一个端子之间连接电元件或电路，则"端口条件"被破坏，二端口的特性表达不再成立。任何电路或电工设备，例如变压器（图2）和双线传输线（图3），如果只对它的端口电流、电压感兴趣时，都可以看成二端口。

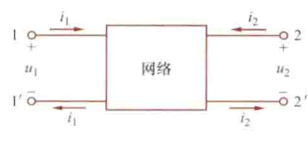


图1 二端口

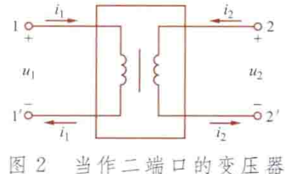


图2 当作二端口的变压器

二端口和四端网络的区别 二端口只有两对独立的电压与电流变量。但是根据基尔霍夫定律，一般的四端网络有三对独立的电压与电流变量。二端口是四端网络的一个特殊情况。

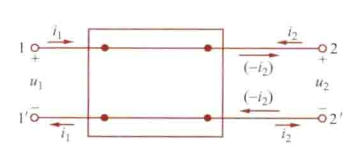


图3 当作二端口的双线传输线

二端口分类 二端口按电路元件的性质有非时变和时变、线性和非线性之分。

(1) 非时变二端口。网络中只含非时变电路元件的二端口。

(2) 时变二端口。一般来说，网络中含时变电路元件的二端口。

(3) 线性二端口。网络中只含线性电路元件的二端口。

(4) 非线性二端口。一般来说，网络中含非线性电路元件的二端口。

线性非时变二端口是常见的二端口。它含两个子类。①互易二端口：网络中只含互易电路元件，一般情况下不含受控源。②非互易二端口：网络中含非互易电路元件（例如某些受控源）的二端口。

线性非时变二端口的端口电流和端口电压之间的关系 二端口有四个端口量，即端口电压u_1、u_2和端口电流i_1、i_2，各电压、电流参考方向如图1中所示。一般来说，其中的某两个可以由另外两个表示出。对于线性非时变二端口，在正弦电流稳态下，端口电压、电流分别用相量$\underline{U}_1$、$\underline{U}_2$和$\underline{I}_1$、$\underline{I}_2$表示。此时，它们中的两个可由另外两个的线性关系表示。表1列出了四组电流、电压关系和表示这些关系的四种参数名称，即开路阻抗参数$\underline{\boldsymbol{Z}}$、短路导纳参数$\underline{\boldsymbol{Y}}$、混合参数$\underline{\boldsymbol{H}}$和传输参数$\underline{\boldsymbol{A}}$。每种表示里有四个参数。若二端口是互易的，例如网络中只含电阻、电感、电容元件时，参数间还存在另一关系，见表1的最后一列。表1中的参数由网络内部元件决定。

表1 线性非时变二端口的电流、电压关系和参数

电流、电压关系	参数矩阵	互易二端口的参数关系
$\underline{U}_1=\underline{Z}_{11}\underline{I}_1+\underline{Z}_{12}\underline{I}_2$ $\underline{U}_2=\underline{Z}_{21}\underline{I}_1+\underline{Z}_{22}\underline{I}_2$	$\underline{\boldsymbol{Z}}$参数$\begin{pmatrix}\underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12}\\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22}\end{pmatrix}$	$\underline{Z}_{12}=\underline{Z}_{21}$
$\underline{I}_1=\underline{Y}_{11}\underline{U}_1+\underline{Y}_{12}\underline{U}_2$ $\underline{I}_2=\underline{Y}_{21}\underline{U}_1+\underline{Y}_{22}\underline{U}_2$	$\underline{\boldsymbol{Y}}$参数$\begin{pmatrix}\underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12}\\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22}\end{pmatrix}$	$\underline{Y}_{12}=\underline{Y}_{21}$
$\underline{U}_1=\underline{H}_{11}\underline{I}_1+\underline{H}_{12}\underline{U}_2$ $\underline{I}_2=\underline{H}_{21}\underline{I}_1+\underline{H}_{22}\underline{U}_2$	$\underline{\boldsymbol{H}}$参数$\begin{pmatrix}\underline{H}_{11} & \underline{H}_{12}\\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22}\end{pmatrix}$	$\underline{H}_{12}=-\underline{H}_{21}$
$\underline{U}_1=\underline{A}\,\underline{U}_2+\underline{B}(-\underline{I}_2)$ $\underline{I}_1=\underline{C}\,\underline{U}_2+\underline{D}(-\underline{I}_2)$	$\underline{\boldsymbol{A}}$参数$\begin{pmatrix}\underline{A} & \underline{B}\\ \underline{C} & \underline{D}\end{pmatrix}$	$\underline{A}\,\underline{D}-\underline{B}\,\underline{C}=1$

在电力工程中，研究传输线时多用$\underline{\boldsymbol{A}}$参数，而且习惯上把端口22′的电流方向反过来（见图3），所以表中最后一行的端口电流改成了$(-\underline{I}_2)$。

线性非时变互易二端口的等效电路 在正弦电流稳态下，不论图1中二端口网络的内部如何复杂，总可以用一个简单的等效电路表示。图4、图5分别是T型等效电路和Π型等效电路。表2是它们的参数关系。稳态运行时，电力变压器常用T型等效电路表示；传输线用Π型电路或T型电路表示。

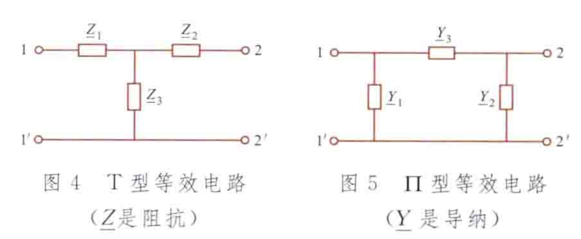


图4 T型等效电路（$\underline{Z}$是阻抗）　图5 Π型等效电路（$\underline{Y}$是导纳）

线性非时变非互易二端口的等效电路 在正弦电流稳态下，这种二端口的等效电路至少含有一个受控源。图6是以T型电路为基础的一种等效电路。这个二端口的$\underline{Z}$参数矩阵和$\underline{Y}$参数矩阵为

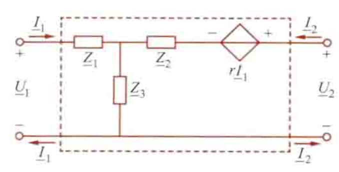


图6 非互易二端口的等效电路

$$\underline{Z}=\begin{bmatrix}\underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12}\\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\underline{Z}_1+\underline{Z}_3 & \underline{Z}_3\\ r+\underline{Z}_3 & \underline{Z}_2+\underline{Z}_3\end{bmatrix}$$

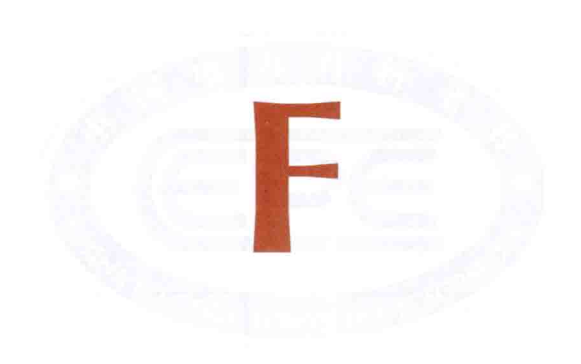
表 2　二端口的参数和等效电路元件参数之间的关系

等效电路	Z 参数	Y 参数	H 参数	A 参数
T 型 （图 4）	$Z_{11}=Z_1+Z_3$ $Z_{22}=Z_2+Z_3$ $Z_{12}=Z_{21}=Z_3$	$Y_{11}=\dfrac{Z_2+Z_3}{\Delta}$ $Y_{22}=\dfrac{Z_1+Z_3}{\Delta}$ $Y_{12}=Y_{21}=\dfrac{-Z_3}{\Delta}$ $\Delta=Z_1Z_2+Z_2Z_3+Z_3Z_1(\Delta\neq 0)$	$H_{11}=Z_1+\dfrac{Z_2Z_3}{Z_2+Z_3}$ $H_{22}=\dfrac{1}{Z_2+Z_3}$ $H_{12}=-H_{21}=\dfrac{Z_3}{Z_2+Z_3}$ $(Z_2+Z_3\neq 0)$	$A=1+\dfrac{Z_1}{Z_3}$ $B=Z_1+Z_2+\dfrac{Z_1Z_2}{Z_3}$ $C=\dfrac{1}{Z_3}$ $D=1+\dfrac{Z_2}{Z_3}(Z_3\neq 0)$
Π 型 （图 5）	$Z_{11}=\dfrac{Y_2+Y_3}{\Delta}$ $Z_{22}=\dfrac{Y_1+Y_3}{\Delta}$ $Z_{12}=Z_{21}=\dfrac{Y_3}{\Delta}$ $\Delta=Y_1Y_2+Y_2Y_3+Y_3Y_1(\Delta\neq 0)$	$Y_{11}=Y_1+Y_3$ $Y_{22}=Y_2+Y_3$ $Y_{12}=Y_{21}=-Y_3$	$H_{11}=\dfrac{1}{Y_1+Y_3}$ $H_{22}=Y_2+\dfrac{Y_1Y_3}{Y_1+Y_3}$ $H_{12}=-H_{21}=\dfrac{Y_3}{Y_1+Y_3}$ $(Y_1+Y_3\neq 0)$	$A=1+\dfrac{Y_2}{Y_3}$ $B=\dfrac{1}{Y_3}$ $C=Y_1+Y_2+\dfrac{Y_1Y_2}{Y_3}$ $D=1+\dfrac{Y_1}{Y_3}(Y_3\neq 0)$

$$Y=\begin{bmatrix}Y_{11} & Y_{12}\\ Y_{21} & Y_{22}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{Z_2+Z_3}{\Delta} & -\dfrac{Z_3}{\Delta}\\ -\dfrac{r+Z_3}{\Delta} & \dfrac{Z_1+Z_3}{\Delta}\end{bmatrix}$$

$$\Delta=Z_1Z_2+Z_2Z_3+Z_3Z_1-rZ_3\neq 0$$

式中 r 是流控电压源的控制参数。



Flash cunchuqi

Flash 存储器 (flash memory) 用浮置栅（也称栅极，是多极电子管中最靠近阴极的一个电极，具有细丝网或螺旋线的形状，有控制板极电流的强度、改变电子管的性能等作用）电容存储电荷的方式来保存信息的一种半导体存储器，又称闪烁存储器（简称闪存），1988 年由英特尔（Intel）公司推出。浮置栅不会漏电，所以断电后信息仍然可以保存。其结构简单，集成度可以做得很高，容量可以很大。对 Flash 存储器的操作一般是进行写、读和擦除。Flash 存储器写入前需要用电进行擦除，数据删除不以单个字节为单位，而是以固定区块为单位，区块大小一般为 256KB 到 20MB。闪存是电子可擦除只读存储器 EEPROM 的变种，EEPROM 与闪存不同的是，它能在字节水平上进行删除和重写，而不是按区块擦写，这样闪存就比 EEPROM 的更新速度快。

由于 Flash 存储器的独特优点，在一些主板上采用 Flash ROM BIOS，会使 BIOS 升级非常方便。Flash 存储器可用作固态大容量存储器。目前研制的 Flash 存储器都符合个人计算机存储卡国际协会（personal computer memory card international association，PCMCIA）标准，可以方便地在各种便携式计算机中取代磁盘存储器，因此也常把它们称为 Flash 固态盘。Flash 存储器的不足之处是容量还不够大，价格还不够便宜。目前主要用于 BIOS、U 盘、MP3 等需要大容量且断电不丢数据的设备。

FORTRAN yuyan

FORTRAN 语言 (FORTRAN) 见程序设计语言。

faguang erjiguan

发光二极管 (light emitting diode，LED) 利用 PN 结的光电效应将电能转换成光能的光电半导体器件。由Ⅲ～Ⅴ族化合物半导体制成的 PN 结，通以正向电流时，能高效率地发出可见光或红外光，且发光强度基本上与正向电流大小呈线性关系。光的颜色与辐射波长有关，而波长则取决于材料的禁带宽度和掺杂种类，已有红、橙、黄、绿四色。合适的材料主要为磷砷化镓、镓铝砷和磷化镓等。发光二极管的特点是工作电压低、亮度高、发光响应速度快、小型化、可靠性高、耐振、耐冲击及寿命长，已广泛应用于各种家用电器、数字化仪表、计量仪器等电子设备之中。

发光原理　发光二极管的 PN 结，当外加正向偏置电压时因势垒降低而产生少数载流子的注入，即 N 区的电子越过 PN 结到 P 区，P 区的空穴越过 PN 结到 N 区，载流子浓度热平衡状态被打破。为了恢复热平衡，载流子将加快复合。这种空穴与电子复合所释放的能量以光的形式辐射出来而发光。

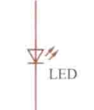


图 1　发光二极管的图形符号

工作方式　分单个 PN 结和多个 PN 结两种情况。

（1）单个 PN 结的发光二极管具有一般二极管的单向导电特性，常在电子设备中作指示灯用，其图形符号如图 1 所示。工作时须将管子置于正向偏置状态，且应串入限流电阻 R 以获得正常发光所需的工作电流 I_F，避免管子损坏。例如 BT201 型、BT202 型、BT203 型的发光二极管，管压降 U_F 为 1.7～3.8V，工作电流 I_F 为 5～10mA，$R=(U_{CC}-U_F)/I_F$。通常数字电路采用 $U_{CC}=5V$ 电源，R 取值在 220～330Ω 之间。直流驱动电路见图 2。逻辑电平的驱动电路见图 3。发光二极管也可串联电阻 R 后直接接到数字集成电路 TTL 或 CMOS 的输出端，如图 4 所示。

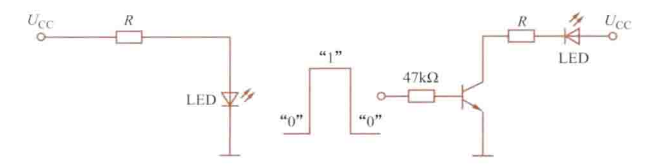


图 2　直流驱动发光二极管电路　　图 3　发光二极管逻辑电平的驱动电路

（2）用多个 PN 结的发光二极管可按分段式或点阵式封装，用作数字、文字和符号显示器。图 5 所示为常用的七段式发光数码管，有共阳极与共阴极显示器两类。图 6 是常采用的 5×7 点阵式矩阵，可用来显示字母。

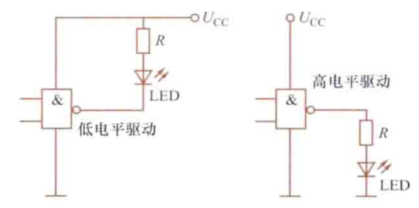


图 4　发光二极管接数字集成电路的驱动电路

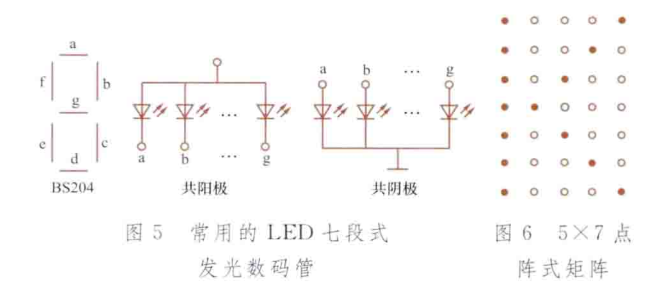


图 5　常用的 LED 七段式发光数码管　　图 6　5×7 点阵式矩阵

扩展应用　发光二极管已从数字、文字显示发展到电视图像显示器，广泛用于计算机、电视机、手机、汽车、照明、信号灯等电子设备。光电耦合器与红外线遥控器中也应用了发光二极管。它还可作为光纤通信的光源，并已出现带微处理器的智能发光二极管显示器，用于各种自动控制系统中。

fare dianzu cailiao

发热电阻材料 (resistive materials for heater) 制造电发热器的材料。要求熔点高，能耐受高、低温冲击，

在高温下工作时化学稳定性好，不易氧化，并具有足够好的高温机械强度及加工性能。常用的发热电阻材料有镍铬合金、铁铬合金、钼、钨、碳化硅等。

镍铬合金和铁铬合金　应用最广泛的热丝材料。镍铬合金的成分大致是：镍不超过80%，铬不超过20%，并含少量铁、锰、硅、碳等。如铬含量增加，其电阻率增大，抗氧化性能提高，但加工性能变差。典型的镍铬丝电阻率约为$(100\sim120)\times10^{-8}\Omega\cdot m$。铁铬合金是镍铬合金的代用品，其耐氧化、耐腐蚀性能优于镍铬合金，但加工性能差。最高使用温度均为1100～1200℃。

高熔点金属发热电阻材料　钼（Mo）的熔点为2620℃，电阻率为$4.77\times10^{-8}\Omega\cdot m$，电阻温度系数为$33\times10^{-4}℃^{-1}$，最高使用温度为1650℃。钨（W）的熔点为3370℃，电阻率为$5.48\times10^{-8}\Omega\cdot m$，最高使用温度为2500℃，电阻温度系数为$45\times10^{-4}℃^{-1}$。高温时应在真空或惰性气体的气氛中使用。在电光源中常用作发光材料。贵金属钛、铂、铱等在特需场合也可用作高温发热电阻材料，其使用温度相应地可达2000、1600、2100℃。使用条件与钨相似。

碳化硅发热电阻材料　在冶金和热处理中，非金属碳化硅常用作高温发热电阻材料，最高使用温度可达1450～1600℃，价格远比金属低廉。石墨棒和粉也可直接用作高温发热电阻材料。

fa

乏　(var)　无功功率的单位名称，符号是var。无功功率的量纲和功率的量纲相同，为了区别于功率的单位名称瓦特，称无功功率的单位名称为乏，或称无功伏安。

在正弦交流电路中，施加于纯电感（或纯电容）上的端电压的有效值为1V，电流有效值为1A时，则它所吸收（或发出）的无功功率为1var。

fala

法拉　(farad)　国际单位制（SI）中电容的单位。简称法，符号是F。电容器两极板间的电压为1V，两极板分别带有量值为1C的正、负电荷时，此电容器的电容定义为1F。法的单位太大，常用的单位是微法（μF）或皮法（pF）。图示为法拉第的画像，电容的单位是以他的名字命名的。



法拉第（Michael Faraday，1791—1867）

fanyi chengxu

翻译程序　(translator)　把某一种程序设计语言表示的程序转换为逻辑上等价的用另一种程序设计语言表示的程序的程序。通常把前一种程序，即翻译程序的输入叫做源程序；把后一种程序，即翻译程序的输出叫做目标程序。用以表示源程序的语言叫源语言，表示目标程序的语言叫目标语言。

如果源语言是高级程序设计语言，而目标语言是汇编语言或机器语言，这种翻译程序称为编译程序。

执行一个用高级语言表示的程序，一般分两步：首先把源程序翻译成目标程序，然后运行目标程序求得结果。

除了编译程序之外，翻译程序还包括解释程序、汇编程序和预处理程序等。预处理程序把一种高级语言表示的程序翻译成另外一种高级语言表示的等价程序。

翻译理论是关于语言翻译的理论，主要从理论上探讨语言的语义、翻译的定义及基本翻译方法。翻译理论除可用于构造编译程序等之外，还可应用于自然语言的翻译、人工智能、模式识别等领域。翻译是字符串对偶的集合，翻译程序定义的翻译是源程序、目标程序这类对偶的集合。翻译程序由词法分析、语法分析和代码生成三个阶段组成，每个阶段又都定义一个翻译，则词法分析定义从源程序字符串到单词串的翻译，语法分析定义单词串到语法树表示串的翻译，代码生成定义这些串到目标语言串的翻译。

定义翻译的基本方法有两种：语法制导翻译方法和转换器方法。

(1) 语法制导翻译是在语法分析基础上进行翻译的方法，亦即根据每个产生式的语义配上一个语义子程序（翻译子程序），在语法分析时，每当一个产生式用于归约（自下而上分析）或用于推导（自上而下分析）时，就调用该产生式的语义子程序完成相应的翻译任务。

(2) 转换器实际上是一种识别程序，识别时每移动一步都发出字符串输出（可能为空输出）。有限转换器是最简单的翻译程序，它是通过让有限自动机每移动一步都可发出输出符号字符串而得到的。许多词法分析程序就是有限转换器模型。

fankui fangda dianlu

反馈放大电路　(feedback amplifier)　把输出信号的一部分或全部按一定的方式送回输入回路中，以改变放大性能的放大电路。由输出回路送到输入回路的信号称为反馈信号。反馈信号在输入回路与外加信号相加（或相减）组成放大器的净输入量。

工作原理　反馈放大电路由基本放大器、反馈网络组成，如图1所示。图中$\underline{X}_o$为输出信号，$\underline{X}_f$为反馈信号，$\underline{X}_i$为原输入信号，$\underline{X}_d$为净输入信号，$\underline{A}=\underline{X}_o/\underline{X}_d$为基本放大器的放大倍数（亦称开环放大倍数）。反馈网络的作用是使系统的输出和输入发生联系，形成反馈环路（亦称闭环），反馈信号$\underline{X}_f=\underline{F}_o$，$\underline{F}$为反馈系数。输出$\underline{X}_o$与输入$\underline{X}_i$之比$\underline{A}_F$为反馈放大器的放大倍数（亦称闭环放大倍数），即

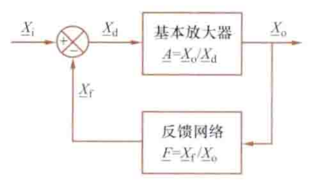


图1　反馈放大电路的方框图

$$\underline{A}_F=\frac{\underline{A}}{1+\underline{A}\,\underline{F}}$$

上式是反馈放大电路的基本关系式，它表示闭环放大倍数与开环放大倍数之间的关系。其中$\underline{A}$和$\underline{F}$为复数，随频率而变，因此$\underline{A}_F$一般也是随频率而变的复数。在中频频段，如$\underline{A}\underline{F}$为正，式中分母$1+\underline{A}\underline{F}$的值大于1，闭环放大倍数变小，相当于负反馈；如$\underline{A}\underline{F}$为负，且其值小于1，式中分母$1+\underline{A}\underline{F}$也小于1，闭环放大倍数变大，则相当于正反馈。当$\underline{A}\underline{F}$为负，且$|\underline{A}\underline{F}|=1$时，系统就质变到自激状态，该式失去意义。

分类　反馈有电压反馈和电流反馈，串联反馈和并联反馈，正反馈和负反馈之分。

从输出回路看，反馈信号取自输出电压［见图2（a）］，则称为电压反馈；反馈信号取自输出电流［见图2（b）］，则称为电流反馈。

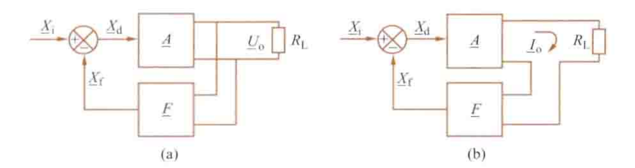


图2　电压和电流反馈方框图
（a）电压反馈；（b）电流反馈

从输入回路看，反馈信号以电压形式送至输入回路，与原输入电压 $\dot{U}_i$ 相串联，见图3（a），称为串联反馈；反馈信号以电流形式送至输入回路，与原输入信号 $\dot{I}_i$ 相并联，见图3（b），称为并联反馈。

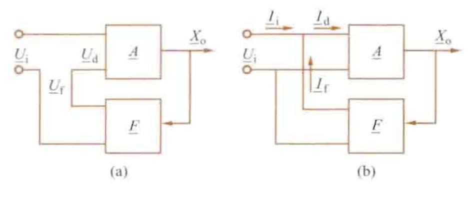


图3　串联和并联反馈方框图
（a）串联反馈；（b）并联反馈

若反馈信号使净输入信号增大，即净输入信号大于原输入信号（$\dot{X}_d > \dot{X}_i$），而使放大量增加的，称为正反馈；若反馈信号使净输入信号减小，即净输入信号小于原输入信号（$\dot{X}_d < \dot{X}_i$），而使放大量减小的，称为负反馈。

负反馈对放大电路性能的影响　负反馈已在实际放大系统中获得广泛应用，因为它能从以下四个方面改善放大电路的性能：①提高闭环放大倍数稳定性；②输入阻抗因反馈信号加入方式不同而异；③非线性失真减小；④展宽通频带。

（1）负反馈能使放大电路的闭环放大倍数趋于恒定，减少受开环放大倍数波动的影响。如果使 $\dot{A}_F = \dot{A}/(1+\dot{A}\dot{F})$ 式中的 $\dot{A}\dot{F}$ 乘积的绝对值比1大很多，则闭环放大倍数绝对值 $A_F \approx 1/F$。这样，只要用比较恒定的无源元件来组成反馈网络，负反馈放大电路的放大倍数就基本上不受开环放大倍数 $\dot{A}$ 的影响。

（2）放大电路的输入阻抗值因反馈信号在输入回路加入方式的不同而异，在图4（a）中，串联负反馈使输入阻抗增加，也就是闭环输入阻抗 Z_{if} 大于开环输入阻抗 Z_i，因为串联负反馈时，$\dot{I}_i = \dot{I}_d = \dot{U}_d / Z_i = (\dot{U}_i - \dot{U}_f)/Z_i$，净输入电压 $\dot{U}_d$ 小于原输入电压 $\dot{U}_i$，所以，$\dot{I}_i$ 由于 $\dot{U}_f$ 的引入而减小，导致 $Z_{if} = \dot{U}_i / \dot{I}_i$ 增加。图4（b）中，并联负反馈使输入阻抗减少，也就是闭环输入阻抗 Z_{if} 小于开环输入阻抗 Z_i，因为净输入电流 $\dot{I}_d$ 小于原信号电流 $\dot{I}_i$，而并联反馈时，其输入端电压是一样的。

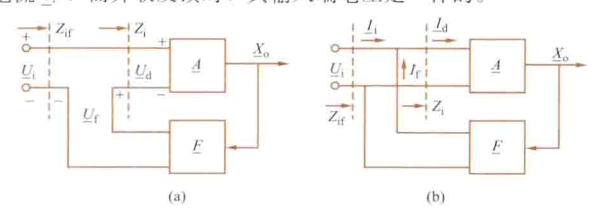


图4　负反馈对输入阻抗的影响
（a）串联负反馈；（b）并联负反馈

放大电路的输出阻抗随反馈信号从输出信号取样的方式不同而异。图2（a）为电压反馈，若为负反馈，则使输出阻抗降低，因为电压负反馈能维持输出电压恒定；图2（b）为电流反馈，若为负反馈，则使输出阻抗增加，因为电流负反馈能维持输出电流恒定。

（3）在相同的输出幅度下，负反馈放大电路的非线性失真比无反馈时要小。但当输入信号的运用范围过大，例如运用到电子器件的饱和与截止状态时，虽采用负反馈，也起不到减小非线性失真的作用。

（4）展宽通频带。电压串联负反馈能使放大电路电压放大倍数的幅频特性变得比较平坦，通频带展宽。

正反馈对放大电路性能的影响　正反馈能增大放大电路增益，但却不能使增益恒定；能有较好的选择性，但频带变窄，且工作稳定性差。例如声音若从扬声器反馈到同一个录音机或放大电路的话筒，就可能引起扬声器的啸叫声，这是由于正反馈作用使放大电路产生自激振荡所致。正反馈能使电路自激振荡的原理常被用来产生正弦波信号（见正弦波振荡电路）。

fankui kongzhi

反馈控制　（feedback control）

见控制系统。

fantiecixing

反铁磁性　（antiferromagnetism）

在无外加磁场的情况下，邻近的完全相同的原子或离子的磁矩，由于相互作用而处于相互抵消的状态，致使合成磁矩为零的现象。理论和实验表明，在“交换耦合”（见铁磁性）作用下，有可能在磁性材料中出现相邻原子磁矩自发地呈反平行整齐排列状态，虽然此时磁矩处于整齐排列状态，但在无外磁场时，单位体积中净磁矩为零，宏观上不呈现磁性，这种现象被称为反铁磁性。Cr、α－Mn、一些稀土金属以及许多含一种或多种过渡族金属、稀土元素和锕族元素的化合物皆为具有反铁磁性的物质。

在弱磁场中，具有反铁磁性物质的磁化率 χ 几乎与磁场强度 H 无关；磁化率随温度变化关系如图1所示。在温度为 T_N 时磁化率具有一极大值，温度 T_N 称为奈尔温度。当温度低于奈尔温度时，相邻原子磁矩基本保持反平行排列；随着温度的升高，这种反平行排列逐渐减弱，因而磁化率逐渐增大；达到奈尔温度，自发反平行排列和相应的反铁磁性消失；温度继续升高，反铁磁性转化为顺磁性，其磁化率随温度变化遵从居里-外斯定律。

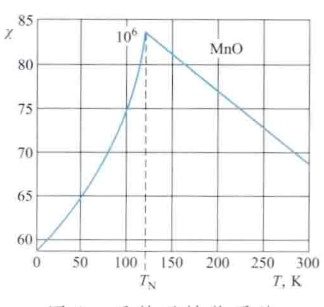


图1　反铁磁性物质的磁化率随温度的变化

铁氧体（或称为铁淦氧、磁性瓷），是一种常用的磁性材料，它是由 Fe_2O_3 为主要成分的强磁性复合氧化物。通过“交换耦合”作用，铁氧体也会引起相邻原子磁矩的反平行排列，但由于相邻原子磁矩大小不同，因此获得未完全抵消

的净磁矩［图 2（a）］，这种磁有序性称为亚铁磁性（Ferrimagnetism），因为这种磁性从宏观上的净磁矩看类似于铁磁性［图 2（b）］，而从微观上磁矩反平行排列看又类似于反铁磁性［图 2（c）］。铁氧体有着广泛的应用，它既可制成永磁体，也可作为软磁材料，其特点是电阻率高（比金属磁性材料高 10^6 以上），在交变磁场中涡流损耗低，适用于作高频、微波等波段的磁性元件。

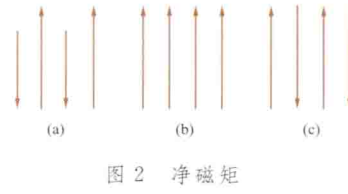


图 2　净磁矩

（a）亚铁磁性；（b）铁磁性；（c）反铁磁性

fangda dianlu

放大电路　（amplification circuit）　通过有源器件的控制作用，使输出信号的波形能按照输入信号的波形加以放大的电子电路。放大电路的核心是晶体管（双极型晶体管和场效应晶体管）、电子管和以晶体管放大电路为基础的集成电路等有源器件。为了实现放大功能，还必须给放大电路提供直流电源（能源）。放大的实质是把直流电源的能量转移给输出信号，输入信号的作用是控制这种转移。电信号的放大是电子电路的基础之一。使用最广泛的集成运算放大器又加速了电子电路小型化和微型化的进程。

分类　放大电路可按所用有源器件、电路功能、电路的耦合方式、使用频率范围、频率特性、特定技术要求或结构方式等加以分类。

（1）按所用有源器件可分为：①分立晶体管放大电路。它常用于电压和功率放大以及高频、微波的低噪声放大。②真空管放大电路。如采用功率三极管或四极管、磁控管、速调管、行波管等常用于高频和微波的大功率放大。③集成运算放大电路。它是应用最广泛的放大电路。

（2）按放大电路的主要功能可分为：电压（或电流）放大电路、功率放大电路、直流放大电路、低噪声放大电路等。

（3）按电路的耦合方式可分为：直接耦合放大电路、阻容耦合放大电路、变压器耦合放大电路。

（4）按使用的频率范围可分为：直流放大电路、音频放大电路、中频放大电路、高频放大电路、射频放大电路。

（5）按频率特性可分为：宽带放大电路、选频（窄频带）放大电路。

（6）按特定的技术要求或结构方式划分为：对数放大电路、反对数放大电路、差分放大电路、运算放大电路、前置放大电路、天线放大电路、弱电流放大电路、隔离放大电路、缓冲放大电路、脉冲放大电路等。

性能指标　放大电路的主要性能指标有增益或放大倍数、频率响应、输入阻抗、输出阻抗、非线性失真系数、噪声系数等。

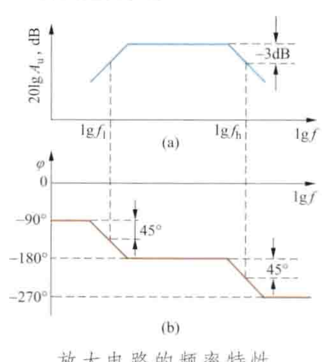
（1）放大倍数：①放大电路的输出电压值 U_o 与输入电压值 U_i 之比称为电压放大倍数，记为 $A_u = U_o/U_i$。电压放大倍数常常用分贝（dB）值表示，称为电压增益，记为 $A_{u(dB)} = 20\lg(U_o/U_i)$，dB；②放大电路的电流放大倍数、电流增益分别记为 $A_i = I_o/I_i$ 和 $A_{i(dB)} = 20\lg I_o/I_i$，dB，其中 I_o 与 I_i 分别为放大电路的输出和输入电流值；③放大电路的功率放大倍数、功率增益分别记为 $A_P = P_o/P_i$，$A_{P(dB)} = 10\lg P_o/P_i$，dB，其中 P_o 与 P_i 分别为放大电路的输出与输入信号的功率值。

（2）频率响应：放大电路的电压放大倍数通常是频率的复函数，可以写成

$$\underline{A}_u = \underline{A}_u(j\omega) = |\underline{A}_u(j\omega)|\, e^{j\varphi(\omega)}$$

式中 $\omega = 2\pi f$；f 是频率；ω 是角频率；$j = \sqrt{-1}$。$|\underline{A}_u(j\omega)|$ 表示放大电路的放大倍数幅值与频率的关系，称为幅频特性，如图（a）所示。其中 f_l 称为放大电路的下限频率，f_h 称为放大电路的上限频率。上限频率 f_h 与下限频率 f_l 之间的频率范围称为放大电路通频带。$\varphi(\omega)$ 表示放大电路输出相对于输入信号的相位差与频率的关系，称为相频特性，如图（b）所示。它们合称为放大电路的频率特性，也称频率响应。放大电路的频率特性应该与被放大的输入信号的频谱相适应，也就是输入信号的频谱应在放大电路的通频带之内，以保证输入信号的各频率分量能同样地得到放大，其相位关系也得到保持。频带过窄以及相频特性的非线性都会引起输出波形失真，称为频率失真，或线性失真。

（3）输入阻抗：由放大电路的输入端向放大电路看进去的交流内阻抗，称为放大电路的输入阻抗，记为 $Z_i = \underline{U}_i/\underline{I}_i$。输入阻抗由输入电阻和输入电容构成。放大电路输入阻抗的大小，表明电路对信号源的影响程度。在测量仪器的放大电路中，常希望有很高的输入阻抗，以减少对被测电路的影响。在高频放大电路或视频放大电路中，又要求输入电阻、输入电容小些，以改善放大电路的高频特性。



放大电路的频率特性

（a）幅频特性；（b）相频特性

（4）输出阻抗：由放大电路的输出端向放大电路看进去的交流内阻抗，称为放大电路的输出阻抗，记为 $Z_o = \underline{U}_o/\underline{I}_o$。输出阻抗由输出电阻和输出电容构成。放大电路输出阻抗的大小，是衡量放大电路带负载能力大小的一个重要指标。若放大电路的输出电压希望恒压，则要求输出阻抗愈小愈好；若放大电路的输出电流希望恒流，则要求输出阻抗愈大愈好。

（5）非线性失真：对于大信号放大电路，例如功率放大电路，放大器件的非线性常常造成输出波形可觉察的失真，称为非线性失真，其大小可以利用非线性失真系数 THD 来衡量。若输入为一正弦波信号，由于非线性失真输出为非正弦波，则非正弦波形可以分解成各次谐波和基波。谐波成分越多，失真越严重，所以常用谐波电压总有效值与基波有效值 U_1 之比来表征失真程度，称为非线性失真系数。其定义为

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}$$

减小非线性失真的主要方法是合理选择放大器件的静态工作点，以及将输出信号限制在放大电路的输出动态范围

之内。

（6）噪声系数：对于微弱信号放大电路，噪声特性是非常重要的。放大电路中的内部噪声主要是电路中电阻的热噪声和有源器件的热噪声、散粒噪声、颤动噪声等。这些内部噪声叠加于放大电路的输出信号上，会使噪声对信号的比重增大，严重时噪声可能淹没信号。衡量放大电路噪声大小的参数叫作噪声系数，记为$N_F=\frac{\text{输入信号功率}/\text{输入噪声功率}}{\text{输出信号功率}/\text{输出噪声功率}}$，噪声系数的分贝值为$10\lg N_F$，dB。

选用低噪声放大器并适当地设计放大电路，可以减小放大电路产生的噪声。

不同用途的放大电路还有其特定的性能指标，例如直流放大电路的零点漂移，差分放大电路的共模抑制比，功率放大电路的最大输出功率和效率，对数放大电路的输入、输出动态范围等。

feijiechu celiang

非接触测量 （non-contact measurement） 以声、光、电、磁等技术为基础，在不接触被测对象的情况下，测量被测物体相关参数信息的方法。

典型的非接触测量方法可分为超声检测、电磁感应、激光干涉、磁光效应、电光效应、电涡流法等。如基于超声波原理的非接触超声波探伤技术、基于磁光效应的非接触电流或磁场测量技术、基于电光效应的电场或电压非接触测量技术、基于激光干涉原理的等离子电子密度和温度非接触测量技术以及非接触红外温度测量技术和激光测距技术等，另外如在研究电晕放电特性时采用红外测试仪和紫外测试仪等。

非接触测量可以减少测量系统本身对被测物体参数的干扰，测量结果更精确；可以测量一些不可接触的物体，如辐射体、高温物体、带电体等。

feijingtai bandaoti cailiao

非晶态半导体材料 （noncrystalline semiconductor materials） 不具有晶格平移对称性的半导体材料。非晶态的主要特征有：①它是一种非平衡的亚稳态，其自由能高于同质的晶体；②长程无序和短程有序。短程有序是在近邻原子间有着与同质晶体类似的结构，但近邻原子间距及键角等与晶体相比稍有不规则的畸变。在重要的非晶态半导体中，原子都是靠共价键或带有极性的共价键相结合的。

非晶态半导体的能带中也存在导带、价带和禁带。但与晶态半导体不同的是，能带中除了存在扩展态外，还存在由无序引起的带尾定域态。扩展态与定域态交界处称为迁移率边，导带迁移率边和价带迁移率边之间称为迁移率带隙。带隙中存在着由缺陷和无序引起的隙态。非晶态半导体也由电子和空穴导电，但其导电机制较复杂，除了扩展态电子导电外，还有定域态电子通过与非晶格子相互作用的跳跃式导电。由于非晶态半导体中大量隙态的存在，其载流子迁移率很低，在室温下电子的迁移率只有5～10$cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$。人们研究最多的为四面体结构和硫系两类非晶态半导体。

（1）四面体结构非晶态半导体。其中主要的有Ⅳ族元素非晶态半导体，如非晶硅和非晶锗（分别为a-Si和a-Ge），以及Ⅲ-Ⅴ族化合物非晶态半导体，如a-GaAs，a-GaP，a-InP，a-GaSb等。这类非晶态半导体的最近邻原子配位数主要为4。

（2）硫系非晶态半导体。这类非晶半导体中含有很大比例的硫系元素，如S、Se、Te等。它们常常是以玻璃态形式出现，例如S、Se、Te、As_2S_3、As_2Te_3、As_2Se_3、Sb_2S_3、Sb_2Te_3、Sb_2Se_3及三元系As_2Se_3-As_2Te_3和四元系Te_2Se_3-As_2Te_3等都属此类，其范围很广。

除此以外，还发现了多种非晶态半导体，其中重要者，如氧化物非晶态半导体（GeO_2、BaO、SiO_2、TiO_2、SnO_2、Ta_2O_3等）、Ⅲ族和Ⅴ族元素非晶态半导体（a-B、a-As等）。在所有非晶态半导体中，氢化非晶硅（a-Si：H）得到最广泛的研究和应用。在a-Si：H中，由于H的掺入，使其隙态密度大大下降，从而在其中首先实现了N型和P型掺杂，制得了具有整流特性的PN结，并进而开发了a-Si：H太阳能电池和薄膜场效应晶体管等非晶态半导体器件。非晶态半导体已日益得到广泛的应用，用于显示、图像传感、静电复印感光膜、光信息存储片（光盘）及各种传感器等。

制备非晶态半导体的主要方法有两大类：一类是从液态经快淬冷却制得，制备块状硫系非晶半导体多采用这种方法，得到的常是玻璃态；另一类是用真空蒸发、溅射、辉光放电及化学气相沉积（CVD）等方法，可制得薄膜状非晶态半导体，制备a-Si，a-Ge及其他四度配位化合物非晶态半导体多采用这类方法。

feijingtai cixing cailiao

非晶态磁性材料 （non-crystal magnetic materials） 具有高磁导率的非晶态材料。在铁、钴、镍中掺入硼、硅、碳、铬、磷等元素可以制成薄片状的高导磁非晶态材料。从各种性能来看，具有良好的应用前景。已开始用于制造配电变压器、脉冲变压器及磁放大器等。其优点是磁导率高而矫顽力小，所以磁滞损耗小；又因厚度小，电阻率高，涡流损耗也小，大大降低了铁芯损耗，节能效果良好。缺点是饱和磁通密度及叠片系数比硅钢片低，铁芯体积增大。此外，非晶铁磁材料对温度及机械应力较敏感，使用温度不宜超过150℃，而且硬度大、质脆、加工较困难。因磁致伸缩系数较大，铁芯在运行中的噪声也大。在已商品化的非晶铁磁材料中，以Metglas 2605 SC合金为例，成分为Fe 81%，B 13.5%，Si 3.5%，C 2%。主要性能：饱和磁通密度1.6T，矫顽力0.04Oe，居里温度415℃，电阻率125$\mu\Omega\cdot cm$，铁损0.2W/kg，饱和磁致伸缩系数$\lambda_S=3\times10^{-5}$。非晶变压器的功率现已达到500kW以上，造价高于一般变压器。但损耗小，运行价格低。此外，非晶态铁磁材料还可用真空镀膜法生长在某些基片上，用作高密度磁记录材料，制作超微磁泡。

feimen

非门 （NOT gate） 实现逻辑非关系的门电路，也称反相器。它是一种常用的逻辑门。

若某件事的发生取决于某个条件的否定：条件成立，这件事不发生；条件不成立，这件事反而会发生。这样的逻辑关系称为“逻辑非”。

图1中，若以$A=1$表示开关S闭合，$L=0$表示灯HW

熄灭；$A=0$ 表示 S 断开，$L=1$ 表示灯 HW 亮。逻辑非的真值表（见逻辑函数）如表所示。其逻辑表达式为 $L=\overline{A}$。

逻辑非的真值表

A	L
0	1
1	0

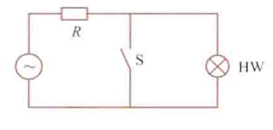


图 1　逻辑非电路

由晶体管构成的非门电路及其图形符号如图 2 所示。

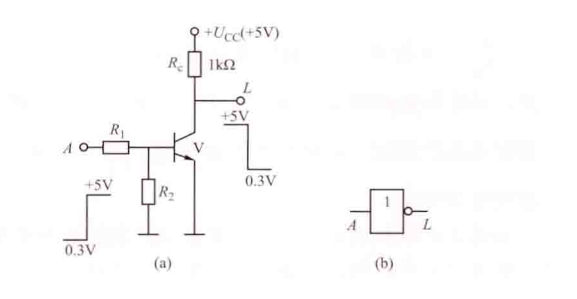


图 2　非门

（a）电路；（b）图形符号

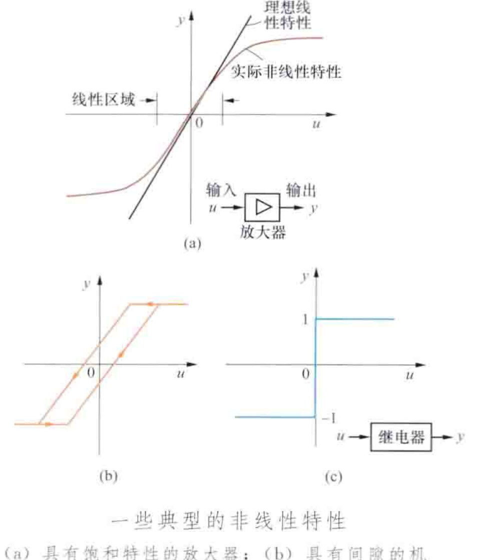
feixianxing kongzhi xitong

非线性控制系统　（nonlinear control system）

具有非线性的控制系统。严格说，实际系统都是非线性系统，线性系统只是为了数学处理上的简化而导出的一种理想化的模型。线性系统可以用叠加原理进行分析（见线性控制系统）。非线性系统具有不容忽视的非线性特征，其中包含有非线性的环节，例如，图（a）是具有饱和特性的放大器，图（b）是具有间隙的机械系统和具有磁滞回线的电磁元件，图（c）是具有继电动作特性的继电器等，以致不能用叠加原理进行分析。

线性系统的行为（稳定性、响应模式）仅仅取决于系统的结构和参数，而与输入的大小和初始状态无关。非线性系统则不然。

在非线性系统中，会出现若干在线性系统中不会出现的特殊现象。有些非线性系统中会出现持续的自激振荡，这种自激振荡具有固定的频率和振幅，在二维的情况下，它在状态空间即相平面中的轨迹是一个孤立的环，称为极限环。有些非线性系统会出现多值响应和跳跃谐振现象，有些会出现分谐波振荡现象等。



一些典型的非线性特性

（a）具有饱和特性的放大器；（b）具有间隙的机械系统和具有磁滞回线的电磁元件；（c）具有继电动作特性的继电器

非线性控制系统的这些特性，使得对非线性控制系统的研究显得很困难，用于分析线性系统的行之有效的方法都无法直接应用于非线性系统。迄今非线性控制系统的分析研究还没有像线性系统那样建立起普遍适用的方法，已经应用的主要方法有线性化方法、相平面法、描述函数法。

（1）线性化方法（包括分段线性化方法）。这类方法只适合于非线性程度较低的光滑的系统，所得结果往往是局部性质。

（2）相平面法。只适用于二阶系统，比较直观、准确。但用于高阶系统则不具直观性，因而失去意义。

（3）描述函数法。一种工程实用的频域分析方法，但难用于非线性程度较高的系统。

feixianxing xitong de xianxinghua fangfa

非线性系统的线性化方法　（linearization method of nonlinear systems）

用一个线性系统来近似一个非线性系统，并且前者的稳定性在一定的条件下能够代表后者的稳定性的方法。

设非线性时变系统的状态方程为 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},t)$，$\boldsymbol{x}$ 是 n 维状态向量，并设 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{0},t)=\boldsymbol{0}$，即状态空间原点为平衡状态。

在平衡状态附近作泰勒（Taylor）级数展开，得

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},t)=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{0},t)+\left[\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}}\right]\Bigg|_{\boldsymbol{x}=0}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$$

记 $\boldsymbol{A}(t)=\left[\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}}\right]\Bigg|_{\boldsymbol{x}=0}$ 为线性化时变矩阵，因为 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{0},t)=0$，于是有 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$，上两式中，$\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)$ 为高阶项。

如果对于所有 t，$\boldsymbol{A}(t)$ 有界，并且

$$\lim_{\|\boldsymbol{x}\|\to 0}\sup_{t\geq 0}\frac{\|\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},t)\|}{\|\boldsymbol{x}\|}=0$$（这里“sup”表示上确界），

则得线性化方程 $\dot{\bar{\boldsymbol{x}}}=\boldsymbol{A}(t)\bar{\boldsymbol{x}}$。$\bar{\boldsymbol{x}}$ 为相应的状态向量。

若上述时变系统的平衡状态 $\bar{\boldsymbol{x}}=0$ 为一致渐近稳定时，原非线性系统的原点（平衡状态）也是一致渐近稳定的。

feizhengxianbo xinhao fashengqi

非正弦波信号发生器　（nonsinusoidal signal generator）

产生基波频率可调的非正弦波电压信号的电子电路。最常用的非正弦波电压信号是矩形波、三角波、锯齿波等，它们经常用于脉冲数字电路中作为信号源。

矩形波和三角波信号发生器　电路如图 1（a）所示，包含两部分：①由运算放大器、稳压管、R_o、R_f、R_1 组成的迟滞型比较器（见比较器）；②由 R、C 组成的有延迟的反馈网络。当接上电源后，输出电压 u_o 等于 $+U_Z$ 还是 $-U_Z$，是随机决定的。设 $u_o=+U_Z$，则 u_o 通过 R 对 C 充电，u_C 不断上升，直到 $u_C=u_p=U_Z R_1/(R_1+R_f)$ 时［图（b）中 t_1］，比较器输出电压 u_o 发生突变，从 $+U_Z$ 变到 $-U_Z$，然后电容 C 转为放电状态，一直放电到 $u_C=-U_Z R_1/(R_1+R_f)$ 时［图（b）中 t_2 点］，u_o 又发生突变，由 $-U_Z$ 突变到 $+U_Z$，电容又转为充电状态。如此周而复始。u_C 为三角形波，u_o 为矩形波。可按电容充放电的公式得矩形波的周期 $T=$

$2RC\ln(1+2R_1/R_f)$，矩形波的频率

$$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{2RC\ln(1+2R_1/R_f)}$$

由上式可见：改变 R、C 或 R_1/R_f 即可改变频率。由图1（b）可知：改变 U_Z 值，即可改变矩形波的幅值。此外，由于电容 C 的充放电时间常数均为 RC，故矩形波的占空比 $D=(t_3-t_2)/T=0.5$。

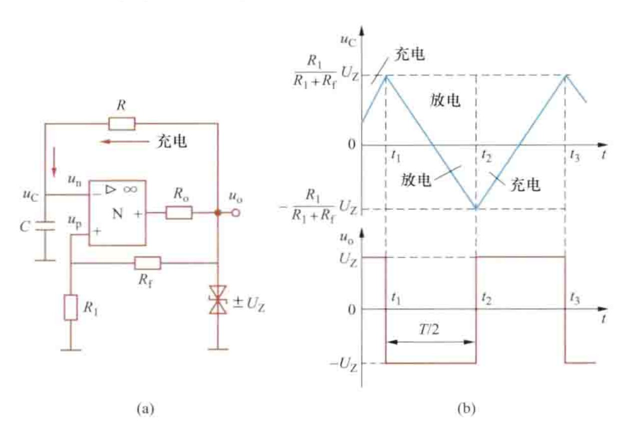


图1 矩形波信号发生器

（a）电路图；（b）波形图

锯齿波信号发生器 电路如图2（a）所示。图中由运算放大器、稳压管和电阻 R_o、R_f、R_1 组成的迟滞型比较器，由结型场效应管和电容 C 构成反馈网络。当 $u'_o=U_Z$ 时，$u_p=U_Z R_1/(R_1+R_f)$，结型场效应管的漏极 d 处于正电位，工作在恒流源状态，它以恒定电流向 C 充电，使输出电压 $u_o(=u_C)$ 直线上升，如图2（b）所示。当 u_C 上升到 $u_C=u_p=R_1U_Z/(R_1+R_f)$ 时，比较器发生跳变，其输出电压 u'_o 由 $+U_Z$ 跳变到 $-U_Z$，使 $u_p=-U_ZR_1/(R_1+R_f)$。此时漏极 d 处于负电位，源极 s 处于正电位，结型场效应管处于倒向工作状态，即 d 起源极作用，s 极起漏极作用，栅极电压为正值，PN 结正偏，s、d 之间呈低阻状态，使电容 C 放电加速。所以，电容 C 的充电时间常数大，放电时间常数小，放电时 u_o 迅速下降，u_o 呈锯齿波。由图2（a）可见：调节 R_s 的大小，即可改变充电电流的大小，从而改变电容的充电时间常数，达到改变锯齿波信号频率的目的。

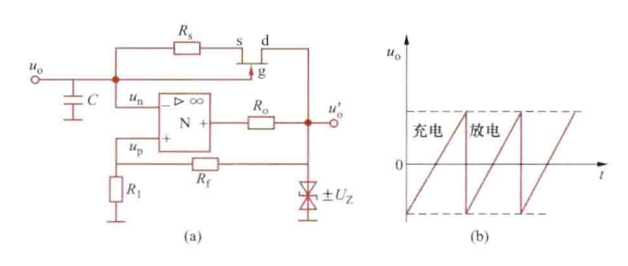


图2 锯齿波信号发生器

（a）电路图；（b）波形图

feizhengxian zhouqi dianliu dianlu

非正弦周期电流电路

（nonsinusoidal periodic current circuits） 稳态电流和（或）电压随时间作周期性但偏离正弦变化的电路。电力系统中含有非线性元件会产生非正弦电流和电压，使电流和电压的波形偏离正弦形而发生畸变。非正弦周期电流（或电压）常用傅里叶级数分解对谐波加以分析。

傅里叶级数表示法 设非正弦周期性波形 $f(t)$ 的周期是 T，频率 $f=1/T$，根据数学中的傅里叶级数理论，它可以分解成一系列正弦量之和，即

$$\begin{aligned}f(t)&=C_0+\sum_{n=1}^{\infty}C_n\sin(n\omega t+\varphi_n)\\&=C_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega t+b_n\sin n\omega t)\end{aligned}\tag{1}$$

式中 $a_n=C_n\sin\varphi_n$；$b_n=C_n\cos\varphi_n$；$C_n=\sqrt{a_n^2+b_n^2}$；$\varphi_n=\arctan\frac{a_n}{b_n}$。常数项 C_0 代表直流分量；$C_1\sin(\omega t+\varphi_1)$ 称为基波，基波的角频率 $\omega=2\pi/T$；$C_n\sin(n\omega t+\varphi_n)$ 称为第 n 次谐波或高次谐波，n 为大于1的整数；$\frac{C_n}{C_1}\times100\%$ 为第 n 次谐波的含有率。

用傅里叶级数表示一个已知非正弦周期波形所需要选取的项数通常是有限的，项数的多少取决于描述实际波形所要求的精确程度。在表中列出几种非正弦周期波形的傅里叶级数及其数字特征量（见平均值、有效值、波形因数和总谐波畸变率）。

非正弦周期波形的频谱 以角频率（或频率）为横坐标、以非正弦周期波形的直流分量、基波和各次谐波的幅值为纵坐标，在对应各 $n\omega$ 处画出高度为 C_n 的直线，构成非正弦周期波形的 C_n 值线谱（$n=0$，1，2，…），该线谱称为非正弦周期波形的幅度频率特性，简称幅频特性。将纵坐标换作 $100\frac{C_n}{C_1}\%$，则线谱表示谐波含有率。以相角 φ_n 为纵坐标构成的线谱，称为非正弦周期波形的相位频率特性，简称相频特性。一般所指的频谱均系幅频特性。各次谐波的角频率是 ω 的整数倍，频谱是离散的。图1是三角波及其离散频谱或幅频特性，在图中将直流分量和基波分别看作零次和一次谐波。

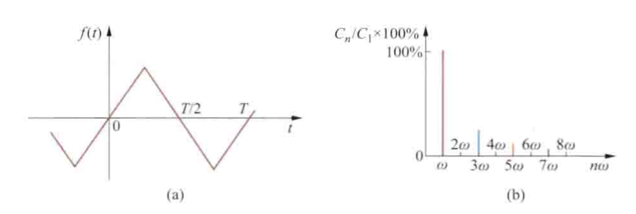


图1 三角波及其离散频谱

（a）三角波；（b）离散频谱

半波对称的波形 在许多情况下，电力系统中的电流和电压的非正弦周期波形满足 $f(t)=-f(t+T/2)$，其后半周期与前半周期的波形相同但符号相反，见图2。这种波形的傅里叶级数中只含基波和 n 是奇数的奇次谐波，而且不含直流分量。

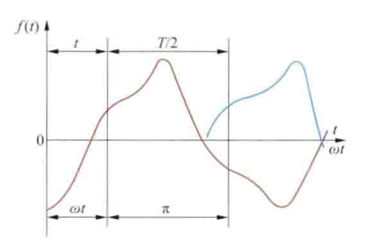


图2 半波对称的非正弦波形

奇函数波形和偶函数波形 非正弦周期波形的时间原点可任意选择，若选择原点能使得 $f(-t)=f(t)$，则称为偶函数波形，该波形的傅里叶级数只含直流分量和余弦项；若选择原

点能使得 $f(-t)=-f(t)$，则称为奇函数波形，该波形的傅里叶级数只含正弦项。

电力系统中的基波、谐波和间谐波　电力系统力求以额定频率 50Hz（或 60Hz）的正弦波形电压按规定的电压水平向用户供电。此额定频率称为工业频率，简称工频。习惯上称工频为电力系统的基波频率，工频电流（电压）定为基波电流（电压）。频率为工频整数倍的正弦分量称为电力系统谐波，也常称它为高次谐波。在电弧炉和粗轧机等负载下，有时会出现周期是额定周期的二倍、三倍等的电流，在这些电流的傅里叶级数里，分别会出现频率为工频的1/2、1/3 等分数倍的正弦分量。这些频率不是工频整数倍的分量称为电力系统的间谐波，其中低于工频的分数谐波又称为次谐波。

几种非正弦周期波形的傅里叶级数及其数字特征

名称	$f(t)$ 的波形	$f(t)$ 的傅里叶级数	平均值	有效值	波形因数	畸变率
正弦波		$A\sin\omega t$	$\frac{2A}{\pi}$	$\frac{A}{\sqrt{2}}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}=1.111$	0
方波		$\frac{4A}{\pi}\left(\sin\omega t+\frac{1}{3}\sin3\omega t+\frac{1}{5}\sin5\omega t+\cdots+\frac{1}{n}\sin n\omega t+\cdots\right)$	A	A	1	$\frac{50\pi}{\sqrt{2}}\sqrt{1-\frac{8}{\pi^2}}\times100\%=48.35\%$
三角波		$\frac{8A}{\pi^2}\left[\sin\omega t-\frac{1}{9}\sin3\omega t+\frac{1}{25}\sin5\omega t-\cdots+\frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{n^2}\sin n\omega t+\cdots\right]$	$\frac{A}{2}$	$\frac{A}{\sqrt{3}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}=1.155$	$\frac{25\pi^2}{\sqrt{6}}\sqrt{1-\frac{96}{\pi^4}}\times100\%=12.12\%$
梯形波		$\frac{4A}{\beta\pi}\left(\sin\beta\sin\omega t+\frac{1}{9}\sin3\beta\sin3\omega t+\frac{1}{25}\sin5\beta\sin5\omega t+\cdots+\frac{1}{n^2}\sin n\beta\sin n\omega t+\cdots\right)$	$\left(1-\frac{\beta}{\pi}\right)A$	$\sqrt{1-\frac{4\beta}{3\pi}}A$	$\frac{\sqrt{1-\frac{4\beta}{3\pi}}}{1-\frac{\beta}{\pi}}$	$\frac{\beta\pi\sqrt{1-\frac{4\beta}{3\pi}-\frac{8\sin^2\beta}{\beta^2\pi^2}}}{2\sqrt{2}\sin\beta}\times100\%$

电力系统谐波和间谐波对电力系统造成污染，它对电力系统的主要危害是：①造成电力电容和电缆的过负载或过电压而引起损坏；②使电机和电器产生附加功率损耗和发热，并可能引起振动；③对继电保护、自动控制装置和计算机等产生干扰和造成误动作；④干扰通信和使示波器等的图像显示失真。

特征谐波和非特征谐波　整流装置和交流电力调整装置等在理想运行情况下固有的谐波，称为该装置的特征谐波。含晶闸管的三相整流装置，设其交流侧电力网三相正弦波形的电压是对称的，直流侧电流是平稳的，晶闸管的触发脉冲是等间隔的，每周期内非同时换相的次数即脉波数为 p，在这种理想情况下在交流侧产生的特征谐波的次数为 $n=kp\pm1$，$k=1, 2, \cdots$。由于交流侧电力网电压波形发生畸变等原因，在装置中可能会产生与特征谐波次数不同的谐波，这类谐波称为该装置的非特征谐波。

短时间谐波　变压器合闸时以及电力机车、绞车等在起动时，会产生短时间的冲击电流。在这个短时间内，将此电流展开为傅里叶级数得到的谐波，称为短时间谐波。

非正弦周期电流电路的计算　计算非正弦周期电源作用于线性非时变电路中的稳态响应时，通常将非正弦电源电压（电流）分解成傅里叶级数，分别计算各电源的同次谐波在该电路内引起的谐波电流（电压）。采用相量计算时，设n 次谐波阻抗为 $\underline{Z}_n$，基波阻抗为$\underline{Z}_1$，对于电阻，$\underline{Z}_n=\underline{Z}_1$；对于电感，$\underline{Z}_n=n\underline{Z}_1$；对于电容，$\underline{Z}_n=\underline{Z}_1/n$。依次计算出直流分量、基波和各次谐波电流之后，根据叠加定理就可以求出电路各支路的非正弦周期电流。电力系统中非线性负荷产生的谐波电流如为已知，则在分析计算时常以谐波电流源代换这些非线性负载，它和其他电源、线性非时变元件一起构成线性非时变非正弦周期电流电路，然后可按上述的方法计算各处的非正弦电流。

fenbushi shujuku

分布式数据库　(distributed database)　由分布在计算机网络的不同地理位置上的若干子数据库所组成的数据库系统。分布式数据库在使用上可视为一个完整的数据库，实际它是分布在计算机每个站点上。分布在各个站点上

的子数据库在逻辑上是相关的，并且由分布式数据库管理系统提供有效的存取手段来操纵这些子数据库。

构成　分布式数据库在集中式数据库系统的组成基础上增加了三个部分：①分布式数据库管理系统。通常包括查询处理子系统、完整性子系统、调度子系统和可靠性子系统等实现协作信息处理。②网络数据字典。主要由数据字典和网络字典组成。它存放与分布式数据库客体有关的各种描述信息和控制信息，使系统能将客户对分布式数据库的存取请求转换为对站点数据库客体的低级操作，并完成维护与管理功能。③网络存取进程。在网络中实现站点间信息存取方法。

特征　分布式数据库有自治性和透明性两个特征：①自治性。允许每个站点对各自管理的信息制定各自使用信息的策略。甚至某些站点所使用的数据可以不参与到全局数据库中。②透明性。这是对分布数据独立性的要求，称为分布透明性。它包括分片透明、位置透明、冗余透明、事务并发操作透明、故障恢复透明和异构透明。若一个分布式数据库系统能提供上述多种透明，则称此系统具有完全透明性，用户可以像使用集中式数据库那样使用分布式数据库。

分类　按结构的不同，分布式数据库系统可分为两类：①全局型分布式数据库系统。一个数据库以完整的方式分布在一个计算机网络的各个站点上。它对用户透明，允许有多份副本，系统具有较高性能。②联邦型分布式数据库系统。分布的数据库必须在逻辑上以某种方式联成一个整体，从单个站点来看，要求访问若干不同的数据库，可不必了解新的接口进程。

分布式数据库系统是分布式数据处理的关键技术之一，在办公自动化、管理信息系统等方面有着广泛的应用。

参考书目

邵佩英. 分布式数据库系统及其应用. 北京：科学出版社，2005.

fenlei suanfa

分类算法

（sorting algorithm）　一种将记录 R_1，R_2，…，R_n 按照其关键字的非递减（或非递增）顺序重新排列的算法，也称为排序算法。按照存储介质来分，排序可分为内排序和外排序两类。对存放在内存储器中的记录进行排序的过程称为内排序；如果文件大到不能同时全部装入内存储器中，而有一部分必须放在外存储器上，则相应的排序称为外排序。

分类算法的时间复杂度与记录的结构特征有关。如果记录是一个有穷字母表上的串，字母在（或能映射到）0 到 $m-1$的整数范围中时，称为是有结构的，可以应用“基数排序”算法，在 $O(n)$ 时间内将 n 个记录的文件排好序。如果待排序的元素缺少结构，其基本运算仅是一对记录之间关键字的比较，这种排序称为基于比较的排序。常用的算法有选择排序、冒泡排序、插入排序、归并排序、快速排序、堆排序和希尔排序等。不论何种基于比较的排序算法，把 n 个记录的文件排好序，其比较次数在最坏的情况下都不会少于 $n\log_2 n$。

按排序的平均时间性能来看，复杂度为 $O(n\log n)$ 的分类算法有：快速排序、堆排序和归并排序；时间复杂度为 $O(n^2)$的分类算法有插入排序、冒泡排序和选择排序；时间复杂度为 $O(n)$ 的分类算法为基数排序。其中，选择排序、堆排序和归并排序的时间性能不随记录序列中关键字的分布而改变。

在排序算法中空间的使用可能有下述三种情况：①排序在原地而只用少量的工作单元，如插入排序、冒泡排序和选择排序；②使用指针表示，故至少用 n 个额外的内存单元来表示指针，如基数排序；③需要另外的存储器来复制要排序的文件，如归并排序。

当待排序的记录中包含有一些相同键码的记录时，如果排序后这些相同键的记录的相对次序保持不变，则相应的排序算法是稳定的；否则为不稳定的，如选择排序、快速排序和堆排序都是不稳定的排序方法。

如果排序算法设计成单处理机完成的，则此排序算法称为串行（或顺序）排序算法；如果排序算法设计成多处理机实现的，则称为并行排序算法。

fenli yuanli

分离原理

（separation principle）　见随机最优控制。

fenliuqi

分流器

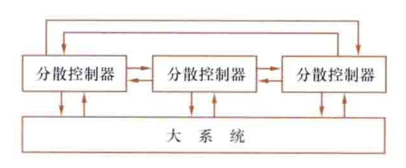
（shunt）　见冲击大电流测量。

fensan kongzhi

分散控制

（decentralized control）　一种由若干分散的控制器或决策者、操作者共同完成大系统的总控制目标的控制方式。

图示为分散控制方式。与集中控制不同，分散控制有其特点，就是所谓非经典信息模式，即信息分散，控制分散，各局部控制器之间不能相互通信，或只能进行部分的，有延时、噪声、信息丢失的相互通信。这样，集中控制理论中常规方法的使用遇到困难。



分散控制方式

在分散控制中，整个被控制对象或过程的控制任务由几个独立的分散控制器共同完成。各控制器没有上下级从属关系，每个分散控制器只能获得大系统的部分信息，也只能对大系统进行局部控制，完成它所分担的控制任务。为了协调，需要横向信息流，即各分散控制之间的相互通信。

在空间上分散的大系统，或在空间上较集中但各个控制通道的动态响应时间（或时间常数）差别较大的大系统，均可采用分散控制。

分散控制的问题有：①各分散控制器平行工作，没有隶属关系，难以进行有效的调整；只能实现大系统全局次优化；缺乏有普遍意义的解法。②控制器间通信的滞后和随机干扰等问题给分散控制结构的分析和综合带来困难。③一般难确定分散控制系统的结构问题。

分散控制理论研究工作主要集中在线性非时变连续时间

的大系统中，主要解决分散控制的稳定性、求状态反馈增益或输出反馈增益和分散鲁棒控制与分散随机控制等问题。

fenshi xitong

分时系统 (time-sharing system) 见操作系统。

fenyaqi

分压器 (voltage divider) 由电阻元件、电容元件或阻容元件组合构成的测量设备，其功能是将输入的高电压转换为低电压输出。它是整个高电压测量系统中的一个重要环节。高电压较难直接测量，所以要通过分压器，使高电压波形不失真地转换成低电压，然后通过低压表计如静电电压表、峰值电压表或示波器、数字测量系统进行测量。分压器的输入高电压与输出低电压之比值称为分压比。事先测量分压器高、低压臂的阻抗值或现场实测高、低电压值可以获得分压比。对于常用的分压器，分压比应稳定在±1%之内，即它应基本上不随所加电压的幅值、加压次数、环境条件（温度、湿度等）而变化，所传递的波形应不失真。为避免对被测电源产生影响，分压器本身的阻抗值不能太低，但对于高电压的分压器（见图1），过高的阻抗值会造成分压比不稳定或所测的波形失真。



图1 高压分压器

分压器按组成的阻抗元件的不同，可分为电阻分压器、电容分压器和阻容分压器（主要是阻尼型电容分压器）三大类。按测量的电压波形不同，又可分为直流分压器、交流分压器和冲击分压器三大类。按测量的不确定度和稳定性的不同，又可分为应用于认可的高电压测量系统中的分压器和应用于标准测量系统中的分压器两类。对这两类测量系统的测量不确定度的要求见高电压测量。

电阻分压器 由电阻元件串联构成的分压器。如图2所示，高压臂 R_1 由多个电阻元件串联组成或由长的优质电阻丝绕成。低压臂 R_2 一般采用与 R_1 一样的电阻材料制成。分压比 $k=u_1/u_2=(R_1+R_2)/R_2$。

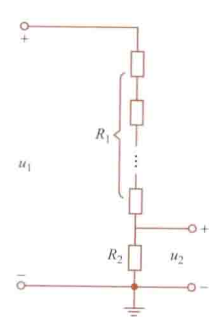


图2 电阻分压器的原理接线

R_1—高压臂总电阻；R_2—低压臂电阻；u_1—被测高电压；u_2—低压侧电压

在直流电阻分压器中，电阻元件可用优质精密金属膜电阻，也可以由电阻率高、温度系数小的合金丝（如卡玛丝）绕成。为了减小绝缘支架泄漏电流和电晕放电的影响，分压器应流过几百微安到1mA的电流。除采用分压器低压侧接高阻抗电压表的测量方法外，通常还采用在分压器接地端串联直流微安表的方法，通过电流指示来确定直流高电压值。

交流电阻分压器中的电阻元件由优质电阻丝采用无感绕法制成。分压器自身对周围环境及对地的杂散电容会使测量产生幅值误差和相位误差；当电压较高时，电阻会严重发热，所以电阻分压器很少用到交流100kV以上。

雷电冲击电压下，电阻分压器适用于2000kV峰值以下。高压臂电阻 R_1 一般取为10kΩ，以电阻丝用无感绕法制成。为减小其对地杂散电容的影响，可以采用浸油的小尺寸高压臂。分压器本身的电感和它对地的杂散电容是造成电阻分压器幅值和波形测量误差的主要因素。低压臂的电压采用同轴电缆连接到测量仪器的输入端。为防止波在电缆中的反射影响，电缆的一端或两端需要进行电阻匹配。

操作冲击电压下，很少应用电阻分压器，因为它会对冲击电压发生器产生的波形造成影响。

电容分压器 由电容元件串联构成的分压器。如图3所示，高压臂 C_1 由多个电容器串联构成，也可由一个充有压缩气体的高压标准电容器构成。分压比 $k=(C_1+C_2)/C_1$。

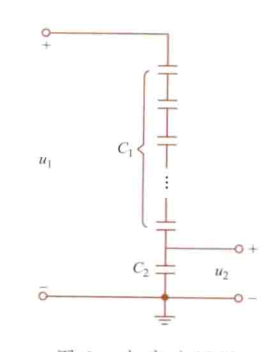


图3 电容分压器的原理接线

C_1—高压臂串联总电容；C_2—低压臂电容；u_1—被测高电压；u_2—低压侧电压

这种分压器用于测量交流电压、雷电和操作冲击电压。高、低压臂电容应尽可能制成无感的。分压器对地的杂散电容会造成幅值测量误差，所以分压器周围的环境也会对实际分压比产生影响。为了减小环境影响，C_1 的电容量不宜太小，工频交流下可取为100～200pF，冲击电压下应当取得较大一些，如为300～400pF。用充气标准电容器（见图4）作为 C_1 时，由于它在结构上采用了对地屏蔽的措施，周围环境对分压比基本上不产生影响。它的电容量一般小于100pF。

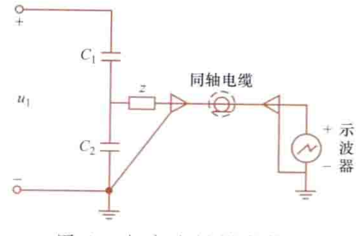


图4 电容分压器所接同轴电缆的匹配

C_1—高压臂电容；C_2—低压臂电容；u_1—被测高压电压；z—匹配电阻

在冲击电压测量时，低压臂的同轴电缆应有阻抗匹配。常用的接线图如图4所示。图中 z 为匹配电阻，其数值等于电缆的波阻抗值。

阻尼型电容分压器 由电阻和电容元件串联的分压器（见图5）。当电容式分压器使用在较高的冲击电压（例如1000kV以上）时，由于引线和电容器本身的电感与分压器的电容及对地的杂散电容之间发生振荡，常会使测得的波形失真或叠加高频振荡。为此，在高压臂电容器元件上分布地串入几百欧姆甚至上千欧姆的总电阻作为 R_1，相应地在低压臂也串进阻值很小的电阻 R_2。令 $R_1C_1=R_2C_2$，分压比 $k=(C_1+C_2)/C_1$。图6为这种分压器的接线图，图中 z 为引线的匹配电阻，取值约为300Ω。$R_1=z+R_{11}+R_{12}+\cdots+R_{1n}$，$C_1$ 为 C_{11} 与 C_{12} 及所有高压臂电容元件的串联值。



图5 3600kV阻尼型电容分压器

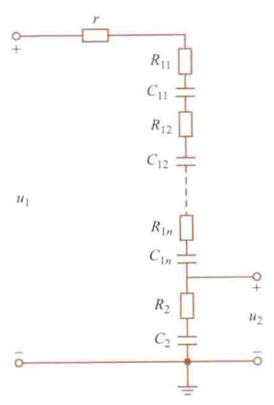


图6 阻尼型电容分压器的原理接线

C_{11}、C_{12}、C_{1n}—高压臂电容元件；R_{11}、R_{12}、R_{1n}—高压臂串联电阻元件；C_2—低压臂电容；R_2—低压臂电阻；u_1—被测高压电压；u_2—低压侧电压；r—引线匹配电阻

fenzi jihualü

分子极化率

（molecular polarizability） 描述电介质极化特性的微观参数，简称极化率。无论哪一种电介质，其组成的分子在外电场作用下会出现感应偶极矩。一般，分子的感应偶极矩μ与作用于它的有效电场强度E_i成正比，即

$$\mu = \alpha E_i \tag{1}$$

比例常数α称为分子极化率，单位是$F \cdot m^2$。

对应于电子位移极化、原子（离子）位移极化和转向极化的极化率分别为电子极化率、原子（离子）极化率和转向极化率。电子极化率α_e的大小与原子或离子的半径有关，而与温度无关。离子极化率α_a与离子间的距离有关，随着温度升高而增大，但增加很小。转向极化率α_d与温度的关系密切，当场强不高而温度又不太低时，即分子热运动的无序化作用占优势的情况下，转向极化率随着温度上升而减小。

电介质总的极化率等于各种极化率之和

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d \tag{2}$$

对于非极性电介质，$\alpha = \alpha_e$；对于极性电介质，$\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d$；对于离子晶体介质，$\alpha = \alpha_e + \alpha_a$。

fenzu jiaohuan gongyong shujuwang

分组交换公用数据网

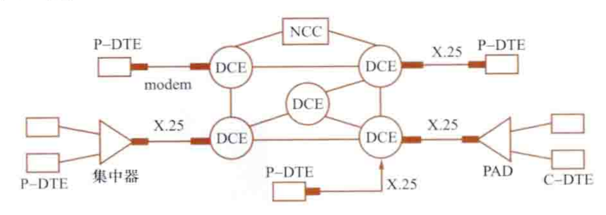
（packet switched public data network） 向公众提供数据传输业务的分组交换网络，是国家公用通信基础设施之一，一般由国家统一建设管理和运营。

1969年底，美国国防部远景规划局的ARPA分组交换网投入运行，开拓了计算机网络的新时代。中国于1989年开通中国公用分组交换网CHINAPAC（China packet network）。到1995年，中国初步建成联通全国省会以上城市的大容量数字干线传输网。“九五”期间基本建成以光缆通信为主干的全国大容量数字干线网。

原理 在分组交换公用数据网内以分组为信息传输的单位，并以存储转发交换的方式从一个交换机传送到下一个交换机，直到目的终端设备。分组含控制信息和数据信息两部分。控制信息是分组的路由信息和分组的管理信息；数据信息是一方要传送给另一方的被分拆成固定长度的报文信息。要发起通信，先由主叫（源）用户以呼叫分组的格式把被叫（目的）地址等控制信息传给与之相连的本地分组交换机，按路由选择机制，把呼叫分组传给后续交换机，最终到达被叫用户，随之在主叫用户和被叫用户之间建立起一条虚拟的电路，称之为虚电路。此后，通信双方将各自要传输的信息，以数据分组的格式，一个个独立、有序地沿着所建立的虚电路传输分组。接收端把所收到的分组内的数据信息装配成完整的报文。

这种通信方式的优点：通信过程中，在两交换机间的电路上，可同时传输来自多个不同用户、不同方向的许多分组，线路的利用率得以有效提高；分组都设有序号和差错校验控制机制，能做到无误传输；网络内交换机或线路发生故障，能重新选择其他路由，传输灵活、可靠。分组交换网还提供速率转换、规程转换和编码转换等功能，以实现速率、规程、编码不同的设备之间的通信。

结构 分组交换公用数据网的结构形式如图所示。数据电路终接设备（DCE）为分组交换机，是分组交换公用数据网的主要设备，实现通信协议、数据交换、路由选择等功能。大容量的分组交换机其端口数近万个，每秒能处理上万个分组。



分组交换公用数据网的结构

NCC为网络控制中心，是全网的核心。负责全网的监视、控制、管理、计费及技术管理等任务。一般采用双机冗余结构以提高可靠性。对于大网采用分区的网络控制中心，在其上设全网的网络控制中心，负责全网的监视及管理功能的协调。

集中器，其主要功能是把多路中速及低速的用户终端送来的数据集中后，以一条高速线路传送到相连的一台交换机，从而提高线路的利用率。网络集中器无需路由选择功能，某些集中器具有本地交换功能。

P-DTE是分组式数据终端设备。国际电信联盟（international telecommunication union，ITU）为分组交换公用数据网和P-DTE之间制定的一个接口标准，即X.25建议，凡提供X.25接口的分组式终端（包括终端、计算机和控制器）都可通过专线与分组交换公用数据网相连。随着分组终端的普及，分组终端通过电话网接入分组交换公用数据网的要求日益迫切，ITU-T为其制订了X.32的建议，它是X.25建议的扩充。

PAD为分组装拆设备，对不具备X.25的起止式字符终端设备（C-DTE）提供进网的设备。它接收字符终端发来的数据，先装配成分组，再发给分组交换机，同时把来自交换机的分组先拆成字符再转发给字符终端。

随着分组交换技术的发展，分组交换网性能不断提高，分组交换机之间的中继线传输速率由9.6kbit/s提高到2.048Mbit/s。20世纪90年代，用户对数据通信网的传输速率提出了更高的要求，而采用已有分组交换技术的分组交换网的能力几乎达到了极限。同时，由于光纤通信技术的发展，

通信线路传输速率大大提高，误码率大大降低，因此发展了快速分组交换技术。快速分组交换的特点是简化通信协议和发展高速交换设备。广泛采用的技术途径有两种：一种称为帧中继技术，另一种称为异步转移模式（asynchronous transfer mode，ATM）。

fengzhi dianyabiao

峰值电压表 （peak voltmeter） 测量电压峰值（即电压的最大瞬时值）的表计。可分为测量交、直流电压的峰值电压表和测量冲击电压的峰值电压表两类，也有既可测量交、直流电压又可测量冲击电压的多用峰值电压表。一般都是数字式仪表。

峰值电压表的测量准确度一般约为±1%，其原理框图如图所示。峰值电压表最高量程一般约为1kV，测量高电压时需和分压器配合使用，即将它和分压器低压臂并联。由于测量球隙和高压示波器测量冲击电压峰值较费时且测量准确度不高，故可用分压器配合峰值电压表来测量冲击电压的峰值。数字存储示波器已广泛应用，可以在测量波形的同时，在示波器屏幕上同时显示出峰值。相比之下，峰值电压表的应用已大为减少。



峰值电压表的原理框图

fuan

伏安 （Volt Ampere） 视在功率的单位名称，符号是V·A（或VA）。1 V·A是施加于二端电路有效值为1V的正弦交流电压、流入有效值为1A正弦交流电流时的视在功率。视在功率与功率的量纲相同，为了区别于功率的单位名称瓦特，称视在功率的单位名称为伏安。电工设备容量（额定视在功率）的单位名称也是伏安。

fumiao texing

伏秒特性 （volt-time characteristics） 绝缘间隙在冲击电压作用下击穿时，间隙上出现的电压最大值和放电时间的关系。伏秒特性可通过实验方法获得。在绝缘间隙上施加固定的标准雷电冲击电压波形（或标准操作冲击电压波形），逐级升高电压。当电压很低时，间隙不击穿；当施加的电压较低时，击穿发生在冲击波尾；当电压很高时，放电时间减至很小，击穿可发生在波前。若每级电压下，只有一个放电时间，则可根据伏秒特性的定义绘得伏秒特性图，如图1所示。实际上放电时间具有分散性，于是每级电压下，可得一系列放电时间，所以实际上伏秒特性是以上、下包络线为界的一个带状区域，如图2所示。

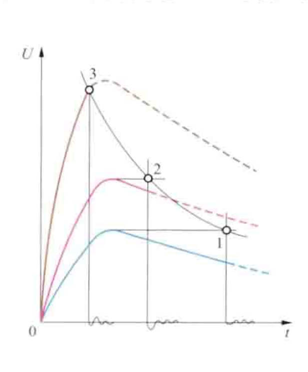


图1 伏秒特性图
1、2—击穿发生在波尾部分；3—击穿发生在波前部分

工程上采用50%伏秒特性，即在每级电压下，可于上下限间选择一个放电时间数值，使放电时间小于该值的概率等于50%，将不同电压下获得的数值连接起来，便可得到50%伏秒特性，如图2中的曲线3所示。

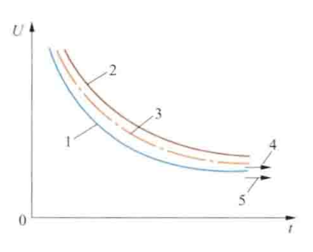


图2 实际伏秒特性的带状区域和50%伏秒特性
1—0%伏秒特性；2—100%伏秒特性；3—50%伏秒特性；4—50%冲击击穿电压；5—0%冲击击穿电压

伏秒特性可用来比较不同设备特别是避雷器与被保护电器绝缘的冲击击穿特性。若某间隙FA1的50%冲击击穿电压高于另一间隙FA2的数值，并且间隙FA1的伏秒特性始终位于间隙FA2之上（如图3所示），则在同一电压作用下，FA2将先于FA1而击穿。于是若将两间隙并联，FA2就可以对FA1起保护作用。但若如图4所示，间隙FA2及FA1的伏秒特性相交，则虽然在冲击电压峰值较低时，FA2能对FA1起保护作用，但在高峰值冲击电压作用下，FA2就不起保护作用了。也就是说，尽管FA1的50%冲击放电电压高于FA2的数值，但在较高峰值的冲击电压作用下，反而是FA1先击穿。在考虑不同间隙绝缘的电气强度配合时，为了更全面地反映间隙的冲击击穿特性，就必须采用间隙的伏秒特性之间的相互比较。从图4可知，总希望保护设备（如避雷器）的伏秒特性平坦一些，即应采用电场较均匀的结构。

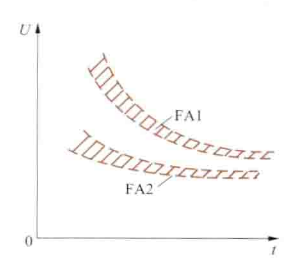


图3 极不均匀电场间隙（FA1）和均匀及稍不均匀电场间隙（FA2）的伏秒特性

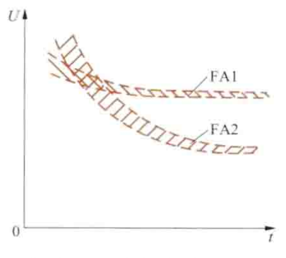
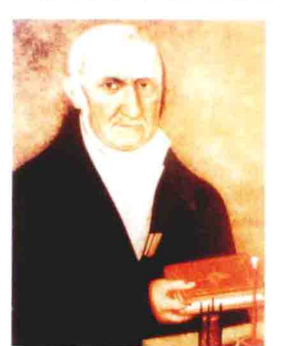


图4 两个间隙的伏秒特性发生交叉的示意图

fute

伏特 （volt） 国际单位制（SI）中电位、电压、电动势等量的单位。伏特简称伏，符号为V，是为了纪念伏打（见图）而命名。导线中流过1A恒定电流时，若导线的两点（即两个等位面）之间消耗的功率是1W，则这两点之间的电位差定义为1V。



伏打（Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta，1745—1827）

fuzhu cunchuqi

辅助存储器 （auxiliary storage） 计算机存储系统内为弥补主存储器容量不足而采用的存储设备，又称外存储

器或文件存储器。它不能被中央处理器随机访问，但可在控制器的控制下，成批地与主存储器交换指令和数据。其特征是存储容量大，可靠性高，非易失性，存取时间较长，每位价格低。

基本原理　辅助存储器由一种或多种存储设备组成。最常用的是磁表面存储设备，它用磁薄膜作存储介质，利用磁性材料的两种不同剩磁状态来存储二进制信息，通过磁头与磁表面相对运动先找到信息块，然后进行读、写操作。磁表面存储设备属非易失性设备，在断电后仍能保存信息。一些设备的记录媒体（磁带、光盘、U盘等）可以拆卸，脱机存放。

类型　根据存取方式可分为：①顺序访问存储设备：严格按照信息的物理顺序定位与访问，如磁带机。②直接访问存储设备：既可顺序又可直接访问记录，存储设备的读写机构能直接寻址到某存储小区，随后顺序读或写，其存取速度快，如磁盘机。

磁盘存储设备在20世纪内占辅助存储器的主导地位。磁盘阵列因具有容量大、数据传输率高、体积小和便于维护等优点，得到发展和应用。集成电路存储卡由于速度快，得到广泛应用。光盘存储器是大容量的辅助存储器，具有存储密度高、容量大、成本低、存储期限长等特点，发展迅速。U盘，又称优盘，是一种微型高容量移动存储器，因其小巧、便于携带、存储容量大、价格便宜、性能可靠等优点，得到广泛应用。

fudianxing qiti jichuan

负电性气体击穿　(breakdown in electronegative gases)

在电场作用下，负电性气体由绝缘状态突变为良导电状态的过程。容易吸附电子而形成负离子的气体称为负电性气体。含卤族元素（如F、Cl、Br、I）的一些气体是负电性很强的气体。负电性气体具有如下击穿特性。

高电气强度　负电性气体的击穿可以用汤森放电理论或流注放电理论解释。工程上使用的是气压大于0.1MPa的负电性气体，这种情况下的击穿过程需用流注放电理论解释。与空气相比，负电性气体的击穿电场强度较高。例如，均匀电场中气压为0.1MPa的SF_6的击穿场强约为空气击穿场强的3倍；其他一些负电性气体的击穿场强大于或略低于SF_6。由于负电性气体的击穿电场强度较高（见表），所以它们也被称为高电气强度气体。

一些负电性气体的击穿特性

气体	$\left(\frac{E}{p}\right)_{crit}\Big/\left[\left(\frac{E}{p}\right)_{crit}\right]_{SF_6}$（气压为0.1MPa时）	$(ph)_{crit}$ (MPa·μm)
$C_2Cl_2F_4$	1.71	3
$CBrClF_2$	1.52	5
C_2ClF_5	1.17	7
CCl_2F_2	1.04	10
C_3F_6	1.03	13
SF_6	1	6
C_3F_8	0.97	7
C_2F_6	0.78	9

卤化物气体具有高电气强度的原因是：①这些气体有很强的负电性，气体分子容易吸附电子而形成负离子，减少了自由电子；②这些气体的分子直径大，电子在其中的自由行程短，不易积聚能量，减弱了电子的碰撞电离能力；③电子和这些气体分子相遇时，易使分子发生极化等过程，能量损失增加，也减弱了电子的碰撞电离能力。

临界（场强/气压）值　气体的电子碰撞电离系数α与电子附着系数η之差称为电子有效碰撞电离系数$\bar{\alpha}$。$\bar{\alpha}$随电场强度E与气体压力p之比E/p而变。$\bar{\alpha}=0$时对应的E/p值称为临界（场强/气压）值$(E/p)_{crit}$。$(E/p)_{crit}$是气体击穿的重要特性之一，仅当$(E/p)>(E/p)_{crit}$时，$\bar{\alpha}>0$，电子崩才会发展而导致击穿。空气的$(E/p)_{crit}=24.4$kV/(mm·MPa)，SF_6的$(E/p)_{crit}=88.5$kV/(mm·MPa)，其他一些负电性气体与SF_6的$(E/p)_{crit}$之比见表。对于负电性气体，当$(E/p)>(E/p)_{crit}$时，$\bar{\alpha}$随E/p的增加而迅速上升，所以发生击穿时的E/p只比$(E/p)_{crit}$值略大。

电极表面突出物的影响　提高气压可以提高气体的击穿电场强度。电极表面有明显突出物时，突出物附近局部区域电场强度剧增，使该区域内的$\bar{\alpha}$迅速上升，电子崩发展，形成流注，导致整个电极间隙击穿。此时，宏观击穿场强与气压之比将小于$(E/p)_{crit}$值。表面突出物的影响程度与气体压力p有关。当表面突出物的高度h与气压p之乘积ph超出临界值$(ph)_{crit}$时，突出物才有影响，即击穿时的E/p值将小于$(E/p)_{crit}$。$(ph)_{crit}$也是气体击穿的重要特性之一。对一定的突出物高度h，当气体压力p增加到使ph值超过$(ph)_{crit}$值时，气体击穿场强随气压增加的趋势将减弱。一些负电性气体的$(ph)_{crit}$值见表。

击穿电压的概率分布　气体击穿电压是随机变量。在均匀或稍不均匀电场中，负电性气体的击穿电压U遵从贡贝尔（Gumbel）分布，概率分布函数为

$$F(U)=1-\exp\left\{-\exp\left[\frac{U-U_{63}}{(U_{63}-U_{05})/3}\right]\right\}$$

式中U_{63}、U_{05}分别是使$F(U)=0.63$、0.05的电压值。

面积效应　当电极面积增大时，出现明显突出物和其他缺陷的概率也增大，因而负电性气体的击穿电压下降。这种电极面积增大使击穿电压下降的效应称为面积效应。面积效应与气体压力有关，气压越高，面积效应越显著。

fulizi de xingcheng

负离子的形成　(formation of negative ions)

电子和某些种类的气体原子或分子相碰撞，附着于气体原子或分子而形成负离子的过程。如F、Cl、Br、O、O_2等原子和分子都易吸附电子而形成负离子，因为它们最外面的电子壳层都是不满的，容易附着电子。这种吸附电子的本领叫做电子亲和势，它的数值等于处于基态的中性原子的能量和它吸附电子形成的负离子的基态能量之差。若这个值是正的，说明形成的负离子是稳定的。

负离子形成的方式有：中性原子吸附电子形成负离子，并辐射出光子；电子、中性原子以及有第三个粒子参加的三体碰撞，形成负离子，并使第三个粒子激励。

具有较高电子亲和势的气体，如SF_6、CCl_2F_2等气体易于吸附电子，形成大量的负离子。与电子相比，离子不易引起分子电离，从而提高了电气强度。如SF_6的电气强度比空气的要高约2.5倍。

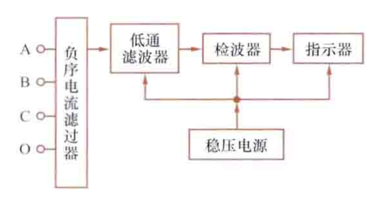
fuxu dianliubiao

负序电流表　(negative sequence current meter)

测量三相电路主要是三相供电系统中负序电流的电表。早期的

负序电流表是独立式的，现在对负序电流的测量，是利用数字化电能质量测量仪器仪表中的相应功能。

独立式负序电流表 一般由负序电流滤过器、低通滤波器、检波器、指示器和稳压电源组成，原理框图如图所示。对于三相平衡负载，负序电流滤过器没有输出；当三相负载不平衡时，负序电流滤过器输出与负序电流分量成比例的交流电压。低通滤波器仅允许交流电压的基波分量通过。检波器则将与基波负序电流成比例的交流电压信号转换成相应的直流电压信号，用以驱动指示器。指示器指示基波负序电流的有效值。



负序电流表原理框图

数字化电能质量测量仪器仪表 具备负序电流测量功能。工作原理为对称分量法，即通过测量三相供电系统各相电流基波分量的幅值和初相角，由三相电流相量计算负序电流分量（相量）。

具体地，先采用滤波器或离散傅里叶变换（DFT）算法，将被测的三相供电系统各相电流中的谐波影响降至最小；再按相关标准，对滤波后的各相电流，截取 10 个基波（50Hz）周期的长度按对称分量法进行计算。

设滤波后得到的三相基波电流为 $i_A = k_A I_N \cos(\omega t + \varphi_A)$；$i_B = k_B I_N \cos(\omega t - 2\pi/3 + \varphi_B)$；$i_C = k_C I_N \cos(\omega t - 4\pi/3 + \varphi_C)$；其中，$k_A$、$k_B$、$k_C$ 分别为 A、B、C 相基波电流的百分数；φ_A、φ_B、φ_C 依次为 A、B、C 相基波电流的初相角；I_N 为额定电流，则负序电流分量 $\underline{I}_2$ 为

$$\underline{I}_2 = I_2\cos\varphi_2 + jI_2\sin\varphi_2$$

式中

$$I_2\cos\varphi_2 = \frac{I_N}{3}\left[k_A\cos\varphi_A + k_B\cos\left(\varphi_B - \frac{4\pi}{3}\right) + k_C\cos\left(\varphi_C - \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

$$I_2\sin\varphi_2 = \frac{I_N}{3}\left[k_A\sin\varphi_A + k_B\sin\left(\varphi_B - \frac{4\pi}{3}\right) + k_C\sin\left(\varphi_C - \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

fudianronglü

复电容率

（complex permittivity） 能同时反映电介质在交变电场中极化与损耗特性的物理量。由于介质损耗的存在，正弦交变电场作用时，通过介质的电流包含一个大的容性电流（其电流密度表示为 $j\omega\varepsilon E$，ω 为电场角频率，ε 是介质电容率，E 为电场强度）和一个小的阻性电流（其电流密度表示为 σE，σ 为等值电导率；E 为电场强度），总电流密度 J 可以表示为

$$J = (j\omega\varepsilon E + \sigma E) \tag{1}$$

对照理想介质的电容电流密度表示式

$$J_C = j\omega\varepsilon E \tag{2}$$

定义复数

$$\varepsilon^* = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{3}$$

为复电容率，其实部 ε' 即是介质的电容率，虚部 ε'' 可表示介质损耗的大小。虚部与实部之比 $\varepsilon''/\varepsilon'$ 正好是介质损耗角正切 $\tan\delta$。复电容率的实部和虚部都是温度和频率的函数。

fugonglü

复功率

（complex power） 正弦电流电路中，实部为平均功率、虚部（或负虚部）为无功功率的复数量。复功率是用相量法分析正弦电流电路时的一个辅助计算量。令二端网络或元件中有功功率为 P、无功功率为 Q，则复功率等于电压相量 $\underline{U}$ 与电流相量 $\underline{I}$ 的共轭复数相量 $\overset{*}{\underline{I}}$ 的乘积，即

$$P + jQ = \underline{U}\,\overset{*}{\underline{I}}$$

或定义复功率等于电压相量 $\underline{U}$ 的共轭复数相量 $\overset{*}{\underline{U}}$ 与电流相量 $\underline{I}$ 的乘积，即

$$P - jQ = \overset{*}{\underline{U}}\,\underline{I}$$

由以上二式可知：复功率的模等于视在功率，它的辐角（或辐角的负值）等于功率因数角。

有功功率、无功功率和复功率都遵守能量守恒定律。即正弦电流电路中各阻抗元件吸收的有功功率之和、无功功率之和和复功率之和分别等于各电源发出的有功功率之和、无功功率之和和复功率之和。引入复功率这一概念给电力网的潮流计算带来很多方便。在谐波潮流计算中也多引用谐波复功率进行分析计算。

fuhe

复合

（recombination） 带正电的粒子和带负电的粒子相碰撞，形成中性原子或分子的过程。复合是电离的逆过程。在复合过程中要放出电离所需的电离能。复合是气体放电区域中，带电粒子消失的主要过程之一。

复合的种类有：

（1）电子 e 和正离子 A^+ 之间的碰撞复合，复合时多余的能量以光子 $h\nu$ 的形式释放出来，即

$$A^+ + e \rightarrow A + h\nu$$

式中 A 为中性粒子；h 为普朗克常数；ν 为光的频率。

（2）正负离子之间的碰撞复合，多余的能量使中性粒子发生激励，即（上标 * 表示激励）

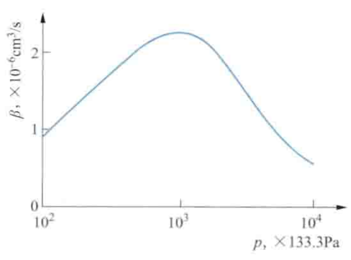
$$A^+ + B^- \rightarrow A^* + B^* \quad (\text{或 } AB^*)$$

（3）在以上两种复合过程中，还有第三个粒子（电子、正离子或中性分子）参加的三体碰撞复合。第三个粒子的参加有助于复合过程的进行。

复合可以发生在气体中、电极上或容器壁上，其结果减少了电离气体中的自由电荷数，降低了它的电导率。在电离气体中，若不持续加上外界的电离因素，其电离度很快就会降低到可以忽略的程度。在电离气体中，由于复合的作用，其带电粒子的数密度 n 随时间 t 而减小的规律为

$$\frac{dn}{dt} = -\beta n^2$$

式中 β 是复合系数。它表征了复合过程的快慢，与气体的种类和气压有关。20℃ 时，空气中 β 随气压 p 变化的规律如图所示。



空气中离子-离子复合系数随气压的变化曲线（20℃）

fuhe cailiao

复合材料 (composite materials) 以高分子化合物为基体与粉状、纤维状或薄片状材料黏合或混合而成的材料。其特点是综合性能好，特别是通常具有较高的机械强度。

用作电气绝缘的复合材料大致分为三类：纤维状填料的复合材料、粉状或短纤维填料的复合材料和复合箔。

纤维状填料的复合材料 最常用的玻璃钢就是以长玻璃纤维或其织物为增强材料；高压电机线圈绝缘实际上也是一种玻璃钢，但除玻璃布外，还有粉云母纸或片状云母以提高电气强度；组合电器用的增强材料是采用聚酯纤维织物，以避免六氟化硫气体分解产物对玻璃纤维的腐蚀作用。

粉状或短纤维填料的复合材料 通常用模压法将其制成电器零件，填料有木粉、石英粉、石棉粉和短玻璃纤维等。填料的作用是降低成本、降低材料的热膨胀系数和热收缩量，有时也能提高机械强度。

纳米复合电介质是指无机纳米粉体与有机聚合物复合的绝缘材料。这类材料往往比原有机基体材料具有更好的耐电晕性能、更高的电气强度和力学性能，可制成绝缘漆、绝缘膜等，已得到了广泛应用。例如，聚酰胺酰亚胺耐电晕漆包线漆、聚酰亚胺耐电晕漆包线漆、聚酰亚胺耐电晕薄膜、耐电晕二苯醚无溶剂浸渍漆、纳米云母绝缘漆等。

复合箔 绝缘纸（包括无纺布）和绝缘薄膜的复合制品。具有薄膜的电气绝缘性能和耐热性，又具有纸的抗撕裂性能，因此广泛用作电机的槽绝缘、线圈相间和匝间绝缘。常用薄膜有聚酯薄膜、聚酰亚胺薄膜等；常用绝缘纸有青壳纸、聚酯纤维纸、聚砜酰胺纤维纸和聚芳酰胺纤维纸（Nomex）等。

fuhe kongzhi xitong

复合控制系统 (composite control systems) 同时包含按偏差的闭环控制和按扰动或输入的开环控制的控制系统，又称开环-闭环控制系统。

按偏差控制即反馈控制，它按偏差确定控制作用以使输出量保持期望值。对于滞后效应较大的控制对象，反馈作用不能及时影响系统的输出，常引起输出量的过大波动。如果引起输出量变化的外扰是可量测的，则用外扰信号直接控制就能更迅速有效地补偿外扰对输出的影响。这种控制方式称为按扰动控制。按扰动控制一般不能单独使用，常需与按偏差控制结合使用，构成复合控制。复合控制能显著减少扰动对系统的影响，有利于提高控制效果。

例如，热交换器的温度复合控制系统，被控制量是出口热水温度，控制量是加热用的蒸汽量。根据热水温度的偏离值，通过相应机构来改变蒸汽量，以调节水温保持在期望值，这一部分属于按偏差控制。热水的流量是热交换的负载，它是这个系统的主要扰动。热交换过程包含时间延迟，使得扰动（流量）的变化不能立即在输出端感受到，需要经过一定的延迟时间才能出现温度偏差信号并产生控制作用，因此仅采用偏差控制常会导致过大的温度瞬态偏差。采用流量计测出热水流量，同时按扰动控制方式来改变蒸汽量，实现复合控制，能大为减少温度瞬态偏差。复合控制系统的稳定性只决定于偏差控制回路。

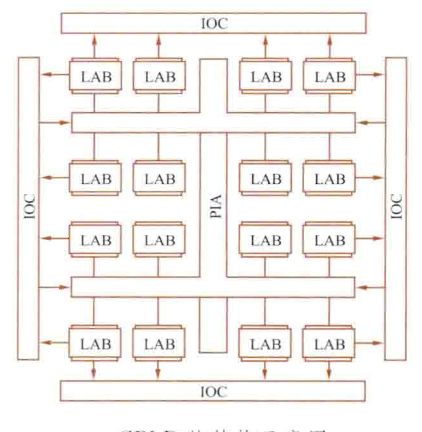
复合控制的另一形式是在反馈控制系统中增加输入信号的直接控制通道。输入信号的直接控制作用，也称前馈控制，这类复合控制系统又称反馈-前馈控制系统。

复合控制的再一形式是引进输入信号的微分（一般为一、二阶微分），与误差信号一起对控制对象进行控制，以改进系统的控制品质。

fuza kebiancheng luoji qijian

复杂可编程逻辑器件 (complex programmable logic device, CPLD) 集成密度大于1000门，具有更多的输入/输出信号、乘积项和宏单元，是在可擦除可编程逻辑器件（EPLD）的基础上发展起来的，采用CMOS EPROM、EEPROM、快闪存储器等编程技术的高密度可编程逻辑器件。它是用户根据各自需要自行构造逻辑功能的数字集成电路。其基本设计方法是借助集成软件开发平台，用原理图、硬件描述语言等方法，生成相应的目标文件，采用在系统编程技术（见在系统可编程的可编程逻辑器件）将目标文件代码编写到CPLD中，实现需要的数字系统。

CPLD规模大，结构复杂，不同厂家、不同系列的CPLD的结构各不相同，但基本包括：逻辑阵列块（logic array blocks, LAB）、可编程连线阵列（programmable interconnect array, PIA）、I/O控制模块（input output control, IOC）等，如图所示。



CPLD的结构示意图

（1）逻辑阵列块（LAB）：CPLD的基本单元，主要包括“与或”逻辑阵列和输出逻辑宏单元（OLMC）等电路。其中“与或”逻辑阵列完成组合逻辑功能，OLMC中的可编程触发器用以完成时序逻辑。

（2）可编程连线阵列（PIA）：遍布各LAB与I/O控制模块之间，可在各个LAB之间、LAB与I/O控制模块之间实现连接，为CPLD各逻辑单元提供灵活可编程的连接，构成各种复杂的系统。由于CPLD内部采用固定长度的金属线进行各逻辑块的互连，所以设计的逻辑电路具有时间可预测性，避免了分段式互连结构时序不完全预测的缺点。

（3）I/O控制模块（IOC）：位于器件四周，是器件引脚和内部逻辑间的接口电路。CPLD通常只有少数几个专用输入引脚，多数是I/O端，每一个IOC控制一个I/O端，IOC的输出多路选择器控制I/O端为输入或者输出状态。

CPLD组合逻辑资源比较丰富，适合组合电路较多的控制应用。早期的PLD只能实现同步时序电路，在CPLD中各触发器时钟可以异步工作，有些器件中触发器的时钟还可以通过多路选择器和时钟网络进行选择。

fuza xitong

复杂系统 (complex system) 一类难以用现有科学方法解释的、具有复杂结构且内部关系高度关联的动力学

行为系统。复杂系统理论认为世界上所有事物都是自治系统，且同时隶属于一个高于其结构的更大系统。每个系统相对于大系统而言，只是其一个或几个构成要素，或是作为某一结构层次的事物而存在。这种层层相属、环环相扣的关系是系统的真实存在形式。复杂系统理论的目的是揭示复杂系统（如工程系统、生命系统和社会系统等）中利用现有科学方法和理论难以解释的某些动力学行为特性。典型的复杂控制系统有网络控制系统、混杂系统、混沌系统和生物系统等。与传统的还原论方法不同，复杂系统理论强调用整体论和还原论相结合的方法去分析与控制系统。主要研究内容有：模型、目标和规律。

（1）模型：通常采用系统内主体及其相互作用或是演化的动态结构来进行描述。

（2）目标：将系统的整体行为作为主要研究目标和描述对象。

（3）规律：以探讨一般的演化动力学规律为目的。

同时，复杂系统理论强调将数学理论与计算机科学进行结合，例如人工生命、人工神经元网络、遗传算法等都可作为其实验手段。

Fuliye bianhuan

傅里叶变换 （Fourier transform） 见动态电路频域分析。



gaochuneng midu dianjiezhi cailiao

高储能密度电介质材料 (dielectrics with high energy storage density) 具有高介电常数、高电气强度和低损耗的电介质材料。储能密度是指在某种测试条件下，材料在一定电场强度下可释放的能量密度。储能密度 J 可表示为 $J=\int_0^{D_{\max}}E\mathrm{d}D$，其中 E 为电场强度，$D_{\max}$ 为饱和场强下的电位移。

在氧化铝、石蜡和大多数聚合物等普通电介质材料中，电位移 D 与电场强度 E 呈线性关系，储能密度为 $J=\frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r E^2$，$\varepsilon_r$ 为相对介电常数。因此，提高储能密度的途径是提高介电常数和电气强度。

在钛酸钡、钛酸锶等铁电体和某些具有铁电性的聚合物电介质中，电位移 D 与电场强度 E 呈非线性关系，介电常数依赖于外施电场。储能密度取决于电气强度、剩余极化强度与饱和极化强度的差值、电滞回线的闭合面积。因此，提高储能密度的途径是提高电气强度、介电常数和饱和极化强度。

在锆酸铅等反铁电体材料中，在低电场下，电位移 D 与电场强度 E 呈线性关系；场强增至反铁电-铁电相变阈值时，电位移 D 与电场强度 E 呈非线性关系，出现双电滞回线。相变电场和电气强度越高，电位移 D 越大，储能密度也就越高。线性介电材料、铁电材料和反铁电材料的储能特性如图 1 所示，图中阴影部分为可释放储能密度。

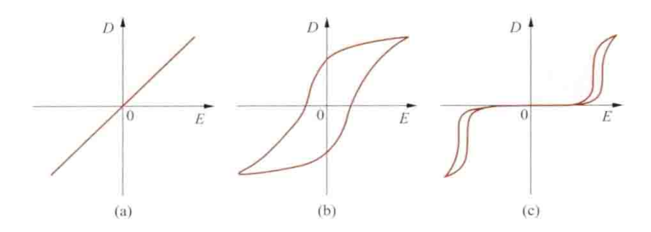


图 1 线性介电材料、铁电材料和反铁电材料的储能特性
(a) 线性介电材料；(b) 铁电材料；(c) 反铁电材料

图 2 所示为各种电介质材料的储能密度。聚合物薄膜的电气强度很高，具有较高的储能密度，高介电常数聚合物的储能密度可达 5J·cm^{-3} 以上；掺杂线性陶瓷的纳米介电材料的储能密度可达（5～10）J·cm^{-3}；反铁电材料由于受到铁电相变和电气强度的制约，储能密度远低于理论值，即使进行绝缘包封处理也只能达到（5～8）J·cm^{-3}。

高储能密度电介质材料的开发和应用仅有 50 多年历史，主要用作高储能密度电容器。在民用方面，主要用于太阳能、风能等新能源发电系统以及混合动力汽车的逆变设备中。在军事应用方面，主要用在坦克、电磁炮、定向能武器、电气化发射平台以及综合全电力推进舰艇中。

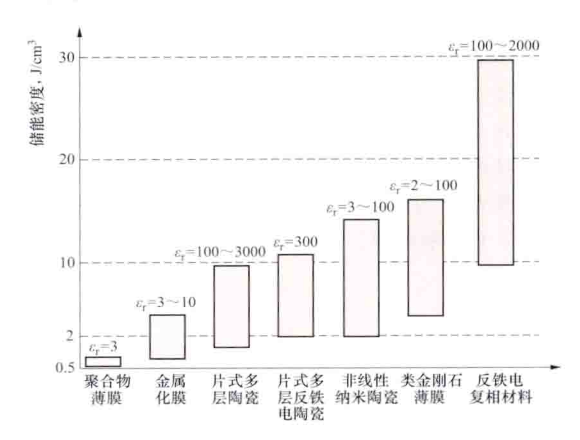


图 2 各种电介质材料的储能密度

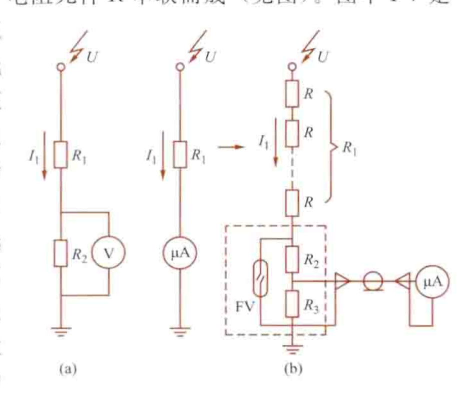
gaodianya celiang

高电压测量 (highvoltage measurement) 对高电压技术领域内电压、电流的峰值及其波形的测量。实现测量的整套装置称为测量系统，用于获取或计算测量结果的软件也是测量系统的一部分。对高电压测量的基本要求是安全、可靠和准确。在高压变电站内对高电压和大电流的测量，主要是采用电压互感器和电流互感器。在高电压实验室或实验基地中，所采用的测量方法可分为直接测量法（例如使用测量球隙、静电电压表等方法）和间接测量法（例如使用以分压器或电场探头作为转换装置，以数字电压表、数字存储示波器作为终端装置所组成的测量系统）。此外，还采用了光电测量系统进行高电压和大电流的测量。高电压测量的基本内容包括：交流高电压测量、直流高电压测量、冲击高电压测量及冲击大电流测量等。

中国国家标准的有关规定 中国国家标准及 IEC 60060—2《高电压试验技术 第 2 部分：测量系统》文件（2010 年第三版）把高电压测量系统分为两类：标准（reference）测量系统和认可的（approved）测量系统。标准测量系统是指其校准可溯源到相关国家和/或国际标准，且具有足够准确度和稳定性的测量系统。认可的测量系统指的是满足标准给出的一项或几项要求的测量系统。在进行特定波形和特定电压范围内的同时比对测量中，该系统用于认可其他的测量系统。上述标准规定了不同种类认可的测量系统，在一定测量条件下的不确定度。例如对于交流试验电压的峰值或有效值、直流试验电压的算术平均值和雷电冲击电压（全波）或操作冲击电压测量的扩展不确定度均规定在±3%范围内，其转换装置等的刻度因数稳定性为±1%。

交流高电压测量 测量峰值或有效值。除可用高压静电电压表或测量球隙分别直接测量其有效值和峰值外，普遍使用电容分压器或电场探头并配以低压表计或仪器进行交流高电压的测量。分压器低压臂接低压静电电压表或峰值电压表，可分别测量电压的有效值或峰值。低压臂并接数字存储示波器可同时测量波形及有效值和峰值，并验证波形是否符合标准。

直流高电压测量　通常是测量电压的算术平均值。应用示波器测量波形，并验证其纹波幅值在标准允许范围之内。因平均值与有效值相差很小，可用高压静电电压表直接测量其平均值，也可用中国国家标准规定的棒-棒放电间隙测量峰值电压。更普遍使用的是由电阻分压器或电压测量阻抗（高压电阻）组成的电压转换装置，该转换装置应能确保其绝缘外表面的泄漏电流对测量不确定度的影响可以忽略。通常使用电阻分压器和低压静电电压表或其他高输入阻抗的仪器、仪表相组合来测量电压的算术平均值及波形。也常用高欧姆电阻器与微安表相串联来测量直流高电压的平均值。上述两种方式都需要有能在高电压下稳定工作的高欧姆电阻器 R_1。R_1 由许多个电阻元件 R 串联而成（见图）。图中 FV 是放电管或稳压器，用于防止低压部分（虚线框内）出现过电压。为保证泄漏电流的影响可以忽略，I_1 一般选为 0.5mA。在测量纹波、瞬态电压或电压稳定性时，测量装置的响应特性应符合要求。纹波幅值测量的扩展不确定度应不大于纹波幅值的 10%或不大于直流电压算术平均值的±1%，取两者中较大者。



测量直流高电压的原理接线图

（a）电阻分压器；（b）高欧姆电阻器串联微安表

冲击高电压测量　测量峰值和波形。中国国家标准规定了测量冲击波形时间参数的扩展不确定度的要求，对认可的测量系统应在±10%范围内；对标准的测量系统应在±5%范围内。用分压器和峰值电压表相配合，可测量电压峰值；用分压器和数字存储示波器相配合，可同时测得波形和峰值。分压器可根据不同的条件，选用电阻分压器、电容分压器或阻尼型电容分压器（即阻容串联分压器）等。测量雷电冲击高电压的分压器需满足较高的响应特性的要求。

冲击大电流测量　测量峰值和波形。一般用分流器或罗戈夫斯基线圈经积分器接峰值电压表或示波器来测量峰值或波形及峰值。

gaodianya ceshi de kangganrao cuoshi

高电压测试的抗干扰措施

(anti-interference measures in high voltage test)　抑制高电压试验中电磁干扰对测控系统影响的各种措施。高电压试验中常有很强的电磁干扰，其主要来源为：①测量和控制电缆外皮中流过的暂态电流；②间隙放电时产生的电磁波辐射；③测量仪器电源线引入的电位和干扰等。其中电缆外皮中流过的暂态电流引起的电磁干扰最严重。为此，高电压试验中测控系统必须采取屏蔽、接地、滤波、隔离等抗干扰措施，尤其是数字化的测控系统，由于工作电平很低，措施更需完备。

针对不同的干扰源，相应的抗干扰措施可归纳如下。

减小电缆外皮暂态电流引起的电磁干扰　测控系统须妥善接地和改进接线，具体措施为：

（1）高压分压器应紧靠接地板，并以最短的宽金属带相连接。

（2）分压器与测量仪器之间敷设金属板或宽金属带作为接地连线。测量电缆应紧靠地面沿此连线敷设，且宜直接敷设在金属板、带之下。

（3）采用双屏蔽同轴电缆或单屏蔽同轴电缆外套一金属管，甚至双屏蔽同轴电缆外再套一金属管。电缆外皮屏蔽或金属管多点接地，至少应两端接地。电缆内层屏蔽在分压器端接地，测量仪器端接地与否由干扰试验确定。

（4）加设共模抑制器。办法是将电缆在铁氧体磁芯环上绕若干圈，或将若干铁氧体小磁环均匀分布地套在电缆上。

（5）测量电缆采取两端匹配的接线方式。

（6）测量仪器具有对称输入通道时，测量电缆可采用平衡接线，即用两条等长度同型号的电缆，始端分别接分压器低压臂两端，末端对称输入到测量仪器，外皮按同样方式接地。这样，两条电缆中形成的电磁干扰可互相抵消。

（7）测量仪器加设外接衰减器，可提高电缆中传递的被测信号，即提高信噪比，以降低干扰对测量的影响。

（8）采用光缆取代电缆。利用光缆隔离分压器与测量仪器之间电的直接联系，可彻底排除此类干扰，并可避免仪器接地与电源中性点不同电位造成的干扰。

防止电磁波辐射形成的电磁干扰　测量仪器设备须加强屏蔽，具体措施为：

（1）采用金属板或网制成全封闭的单层或双层屏蔽室（柜），将测控仪器设备置于屏蔽室（柜）内，屏蔽室（柜）直接接地。

（2）分压器低压臂外装接地的金属屏蔽套。

（3）采用屏蔽电缆，两端均以同轴插头分别与分压器和测量仪器相连。

降低电源线引入的电磁干扰　测量仪器的供电电源须增设滤波和隔离等措施：

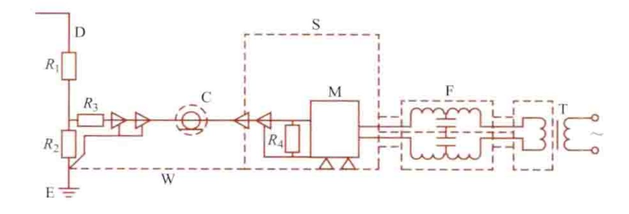
（1）测量仪器电源入端串接一低通滤波器（通称电源滤波器）。

（2）测量仪器通过隔离变压器供电，隔离变压器的屏蔽与测量仪器的屏蔽室（柜）相接。

（3）测量仪器采用不间断电源（UPS）供电，测试时断开外电源连线。若有条件也可采用电池供电。

（4）采用光缆取代测量电缆。如上所述，可避免电源线引入中点电位造成的干扰。

电阻分压器测量系统采用的抗干扰综合措施实例如图所示。



抗干扰综合措施实例

D—分压器；R_1、R_2—高、低压臂电阻；R_3、R_4—电缆始、终端匹配电阻；C—双屏蔽电缆；E—接地极；W—金属板接地连线；S—屏蔽室；M—测量仪器；F—电源滤波器；T—隔离变压器

在数字化测量中，可以根据各类干扰的特点，采用不同的数字滤波算法进行滤波，以获得较高的信噪比。

gaodianya jishu

高电压技术 (high voltage technology) 研究有关高电压的理论、实验、应用的电工技术。它研究在高电压作用下电介质的放电和绝缘性能，不同波形的高电压、大电流的产生及测试方法，过电压的产生机理和防护措施，高压静电场的计算和实测，强电磁环境及其保护，高电压的应用技术等。高电压技术所涉及的范围主要是在几十千伏至几兆伏电压下的一些技术问题。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“高电压技术”部分。

参考书目

严璋，朱德恒．高电压绝缘技术．2版．北京：中国电力出版社，2007.

张仁豫，陈昌渔，王昌长．高电压试验技术．3版．北京：清华大学出版社，2009.

gaodianya jueyuan shiyan

高电压绝缘试验 (high voltage insulation test) 确定电气设备的绝缘结构或绝缘模型在高电压作用下的电气性能的试验。该试验用于对绝缘的设计及计算，材料及工艺的质量，运行中的劣化等作出评价。

电力工程对高压电气绝缘的电气性能、机械性能、温度和热稳定性及化学稳定性都有一定的要求。高电压绝缘试验通常只包括对电气性能的考核，其他诸方面的影响因素则作为电气试验的条件来加以考虑。

高电压绝缘的电气性能主要表现在强电场作用下的导电性能、介质损耗和电气强度三个方面，相应的高电压绝缘试验有：导电性能测量、介质损耗测量、电气强度试验。

导电性能测量 正常绝缘的导电能力应很弱，受潮或劣化的绝缘，其绝缘电阻会下降，泄漏电流会增大。为避免极化电流的影响，应在直流电压下测量绝缘的导电性能。主要包括绝缘电阻测量和泄漏电流测量。①绝缘电阻测量。可通过专用的绝缘电阻表（又称兆欧表）进行，例如有一种是内附手摇发电机的兆欧表，也称作摇表。用它可直接测出绝缘电阻的数值。在进行绝缘材料研究时，可采用能测量高于10^9 MΩ电阻值的高阻计来测量绝缘电阻。②泄漏电流测量。在直流高电压作用下，测量通过绝缘的微弱电流。与绝缘电阻测量相比，泄漏电流测量时试验电压较高，使检测缺陷的能力提高。有时试验电压高达绝缘的耐受电压水平，即可与耐压试验同时进行。泄漏电流测量所用的电源是直流高电压发生器，所用的表计通常为微安表。

介质损耗测量 主要为介质损耗角正切测量。由于绝缘介质在电场作用下出现极化现象和电导现象，介质在正弦交流电压的作用下，产生一定的功率损耗。介质损耗角正切（损耗因数）常用西林电桥来测量。在测量过程中同时可测得试品的电容量，经过计算可求出材料的电容率（介电常数）。

电气强度试验 包括耐压试验、击穿试验及闪络试验。耐压试验、击穿试验或闪络试验所施加的电压可以是直流、交流、雷电冲击（全波和截波）和操作冲击电压，它们是考核高电压绝缘安全可靠性最直接的试验。

(1) 耐压试验是在一定条件下对试品施加一定的电压，在经受一定时间之后，以是否发生击穿作为判断试品是否合格的试验，施加电压值一般高于试品的工作电压。

短时间的耐压试验不能有效地考核长时间工作电压下绝缘的性能。绝缘内部缺陷或弱点在长期工作电压作用下会发生持续的局部放电，绝缘性能不断劣化，最终导致绝缘损坏。局部放电测量可以检验绝缘长期耐受电压的性能，近年来得到越来越广泛的应用。

耐压试验需要使用相应的高电压试验和测量设备，还要求具备辅助的试验条件（例如淋雨装置等），这些试验通常在高压实验室内进行。近年来六氟化硫绝缘的电气设备得到广泛应用，提出了在现场进行直流、交流、冲击耐压试验的要求，促进了现场耐压试验装备技术的研究和发展。

(2) 击穿试验是在一定条件下逐渐增高施加于试品的电压，直到发生击穿的试验。要确切得出试品绝缘电气强度的数值就必须作击穿试验。进行击穿试验时，试品通常会发生破坏，因而不适用于还要继续使用的设备。耐压试验有可能引起击穿或虽不引起击穿，但由于施加电压较高，会引起较强烈的局部放电，造成局部绝缘受损，因此这类试验通常称为破坏性试验。为防止试验引起材料破坏的积累效应，耐压试验不宜重复多次进行，当考虑有必要重复进行时应根据标准降低施加的电压。

(3) 闪络试验是在一定条件下对试品施加电压，直至在气体或液体电介质中沿绝缘表面发生贯通性放电的试验。

为了对运行中的电气设备作连续监视，以便及时发现隐患，防止突发事故，已开展了在线进行高压绝缘试验的工作（见绝缘诊断技术）。

gaofenzi jueyuan cailiao

高分子绝缘材料 (polymer insulating materials) 以有机高分子化合物为基料的绝缘材料。主要成分是有机高分子化合物，其分子量可高达数千甚至数百万以上，添加成分有增塑剂、稳定剂、固化剂、催化剂、填充剂、补强剂、阻燃剂等，可按使用要求进行选择。高分子绝缘材料可大致分为热塑性塑料、热固性塑料、橡胶、纤维材料、层压材料、绝缘涂料和薄层材料（薄膜、漆布）等。

高分子绝缘材料加工性能好，通过添加成分的变化，可以在很宽的范围内调节绝缘材料的绝缘性能、机械性能和耐热性能，甚至可调节耐化学性能、耐潮性能和耐辐射性能，以满足各种电气设备的不同性能要求。在各种绝缘材料中，它的应用范围最广，品种最多，生产量也最大。

高分子绝缘材料的工作温度通常比无机绝缘材料低得多，其工作温度上限或下限主要取决于高分子化合物的转变温度。结晶型高分子塑料、纤维及薄膜制品，上限往往接近熔点；非晶型高分子塑料，上限往往接近玻化温度或分解温度。它们的下限都是脆折温度。橡胶的工作温度上限是粘流温度或分解温度，下限是玻化温度。

gaoji liangce tixi

高级量测体系 (advanced metering infrastructure，AMI) 完成电力系统中的计量测试任务，集数字传感、智能电表、通信网络、测量及通信、监测与诊断、用户与管理者

交互、供用电数据信息采集与处理等相关技术于一体的智能化计量测试软硬件资源的有机集合。

在智能电网中，AMI是可按具体需求进行设计、配置的智能化计量测试基础设施；是实现多种能源包括清洁可再生能源转换为电能量的准确、异地/远程、双向计量，并能使电网公司（公共事业公司）与用户共享相关数据信息，进而实现交流互动所需的科学方法、技术手段、基础设施的原理性架构。

AMI的具体实现又称高级量测系统，一般由自动抄表系统和量测数据管理系统组成。

自动抄表系统　(automatic meter reading，AMR)　基于传感器、数据采集、计算机、通信网络等技术，准确获取电能等生活需量的生产量和耗用量的数据信息，并将其可靠传输至计费管理中心主控计算机的系统。它利用光纤、公共电话网络、负荷控制信道或低压配电线载波等通信渠道，将工业、商业、居民等各类用户的电能表或智能电表测得的数据信息自动采集并传输至计费管理中心并做分析处理。

量测数据管理系统　(meter data management system，MDMS)　配有分析处理工具软件的数据库系统。数据信息经其分析处理后，可与其他系统进行交互并共享。高级量测系统中的MDMS，主要完成对数据信息合法性的核对、评估及确认，以确保进入高级量测系统中的数据信息真实、准确，从而为电网公司、用户决策形成新的供、配、用电方案提供可靠的数据信息支持。

AMI通过智能电表与主控计算机之间建立起的安全网络架构，在电网公司与用户之间实现能量的双向计量及其数据信息的双向通信，可明显改善对在电网中正在发生状况的了解和掌控，成为实现分布式电源结构和推动电力市场实行灵活电价机制的前提条件，是改善能源利用效率、实现智能电网建设的重要技术支撑。

gaosi tongliang dingli

高斯通量定理

(Gauss flux theorem)　见电通密度、静电场。

gaosu huanchong cunchuqi

高速缓冲存储器

(cache)　处于中央处理器(CPU)与主存储器之间（有的制作在CPU芯片内部）用于解决CPU与主存储器速度不匹配的存储器。由高速双极型半导体器件实现。它与主存储器的数据交换由硬件实现，对系统程序员透明。高速缓冲存储器由高速随机存取存储器、地址映射机构以及替换逻辑电路组成。

基本原理　高速缓冲存储器与主存储器划分为相同长度的字块，以便于数据交换。当CPU进行读操作时，由地址映射机构判别所访问的字是否在高速缓冲存储器中，若在，则直接由高速缓冲存储器读入CPU；否则，访问主存存储器有效，将包含该字的字块从主存储器装入高速缓冲存储器，同时将被访问的字直接送CPU。当CPU进行写操作时，若该字单元在高速缓冲存储器中，则直接将它写入高速缓冲存储器，且同时更新主存储器（全写法），或在当它从高速缓冲存储器内被替换时写回主存储器（写回法）。

替换逻辑电路　当主存储器的字块无法调入高速缓冲存储器的相应空间时，由替换逻辑电路按某种替换算法，将主存储器中的新字块覆盖在被替换的字块上。常用的替换算法有：①先进先出（first-in first-out，FIFO）算法：选择一个进入高速缓冲存储器时间最长的字块换出；②最近最少使用(least recently used，LRU）算法：选择CPU最近最少访问的字块换出。

gaoxingneng jisuan

高性能计算

(high performance computing)　从体系结构、并行算法和软件开发等方面研究开发高性能计算机的技术，是计算机科学与技术的一个分支。通常使用很多处理器（作为单个机器的一部分）或者某一集群中组织的几台计算机（作为单个计算资源操作）构成计算系统和环境。

高性能计算主要依赖于同时执行多个任务，或多条指令，或同时对多个数据项进行处理的计算机系统。早期的计算机是串行逐位处理的，称为串行计算机，现代计算机均具有不同程度的并行性。并行处理计算机的结构主要有流水线处理机、多功能部件处理机、阵列处理机、多处理机系统和数据流处理机，其方式的不同代表着高性能计算的不同方面。

流水线处理机　将指令的执行过程分解为若干段，每段进行一部分处理。一条指令顺序流过所有段即执行完毕获得结果。当本条指令在本段已被处理完毕而进入下段时，下条指令即可流入本段。因此，在整个流水线上可以同时处理若干条指令。若各段的执行时间均为一个时钟节拍，则在正常情况下每拍可以输出一个结果，即完成一条指令。这就加快了处理机的速度。图1是将指令处理分为取指令、指令译码、取操作数、执行的流水线结构示意图。

多功能部件处理机　使用不同的功能部件并行执行几条指令，以提高处理速度，包括浮点加、定点加、浮点乘、浮点除、逻辑操作、移位等多个对不同数据进行处理的功能部件。

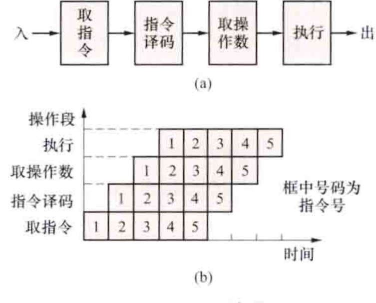


图1　流水线结构
(a) 指令处理流水线；(b) 流水处理时间图

程序在执行中因对各部件的需求不平衡，各功能部件不可能全部处于忙碌状态。指令间的相关性也影响机器的效率，如本条指令所需的功能部件尚在执行其他指令；又如本条指令所需操作数恰为尚未执行完毕的指令的结果等。

阵列处理机　由多个相同的处理部件和一个统一的控制器组成。这个控制器解释指令并传送操作命令至全部处理部件。各处理部件按照控制器的命令同时进行完全相同的操作。阵列处理机又可分为浮点阵列处理机和位片式阵列处理机两类。

ILLIAC-Ⅳ机属于浮点阵列处理机（图2），包括64个完全相同的处理部件（processing unit，PU）和一个公共的控制部件（control unit，CU）。每个处理部件包括一个能执行64位浮点操作的处理单元（processing element，PE）和

一个容量为 2K 字的程序存储器（program memory，PM）。64 个处理部件排列成 8×8 阵列。每个处理部件与四邻处理部件均有直接数据通路。

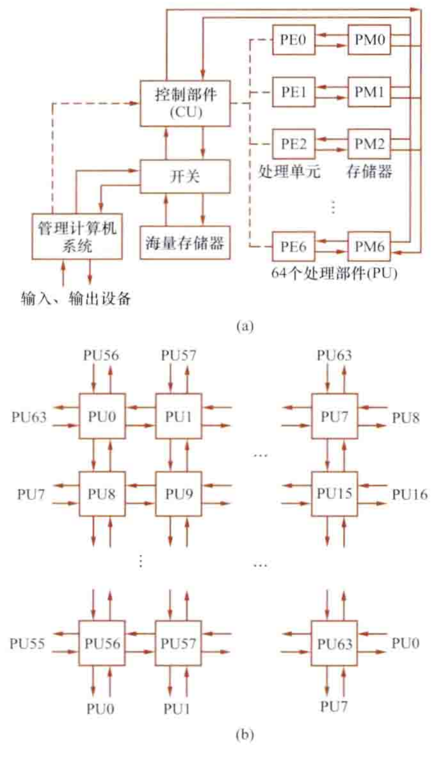


图 2　ILLIAC-Ⅳ阵列处理机原理图
（a）机器构成；（b）处理部件间的数据通路

多处理机系统　能提高系统的性能和可靠性，是多指令流多数据流处理机。根据系统中各处理机的耦合程度，多处理机系统可分为两类：①非直接耦合的多处理机系统，系统中各处理机均有主存储器。各处理机由各自的操作系统进行管理，它们通过共享的输入/输出系统进行通信。②直接耦合的多处理机系统，系统中各处理机共享主存储器，并受统一的操作系统管理。多处理机系统一般指直接耦合这一类。

在直接耦合多处理机系统中，实现处理机与存储器、处理机与处理机之间连接的互联网络十分重要。互联网络有三种主要形式。

（1）总线结构。总线结构是多处理机系统中最为简单的网络结构。实际的多处理机系统的互联网络，往往是在总线结构的基础上发展起来的（图 3）。

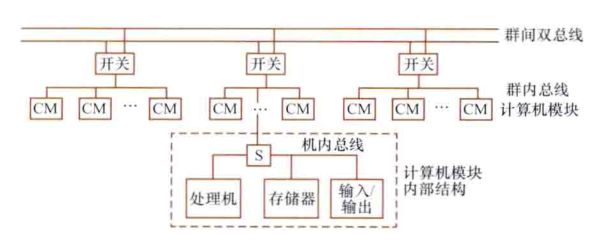


图 3　三级总线结构

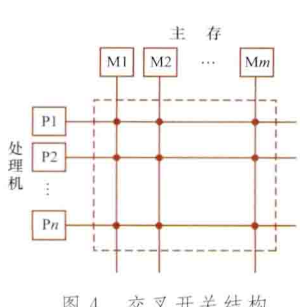


图 4　交叉开关结构

（2）交叉开关结构。交叉开关由纵横开关阵列组成，将横向的处理机与纵向的存储器模块连接起来（图 4）。

（3）多端口存储器结构。把交叉开关结构中的各交叉点上的开关移到相应存储器的接口内部，形成多端口存储器结构。

数据流处理机　是受到人们重视的高度并行的处理机，它不按程序计数器指出的指令顺序执行程序，只要所需操作数全部具备，指令即可被执行，亦即程序的执行不是由控制流驱动，而是由数据流驱动。

数据流处理机是以语言为基础的处理机（图 5）。它使用数据流程序图作为用户语言与计算机结构之间的接口。数据流程序图用能动框表示，每个能动框有多个域，分别存放操作码、操作数和目标地址。数据流程序以能动框集合的方式保存在能动存储器中。当某条指令可以执行时，相应的能动框地址便被送入指令排队器。读取部件则按地址从存储器中取出该能动框，形成操作包，送至操作部件进行处理，产生结果包。修改部件根据结果包的目标地址将结果数据送至规定的能动框作为操作数，并将具备操作数的指令的地址送至指令排队器。指令排队器中的指令均具备执行条件，因而只需增加部件数量或增强部件流水程度，就可以高速并行执行。此外，还可将多个指令处理单元连接成数据流多处理机系统，进一步提高处理能力。

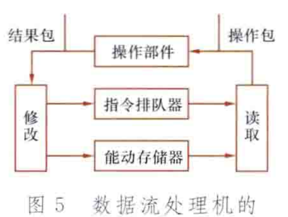


图 5　数据流处理机的指令处理单元

高性能计算机的衡量标准主要以计算速度（尤其是浮点运算速度）作为标准。随着信息化社会的飞速发展，人类对信息处理能力的要求越来越高，包括石油勘探、气象预报、航天国防、金融、政府信息化等领域。

gaoya gonglü MOSFET menji qudong dianlu

高压功率 MOSFET 门极驱动电路　(high voltage power MOSFET gate driver)　用来开关高压电路中功率 MOSFET 的门极控制电路，又称高压浮动 MOS 门极驱动器。

驱动电路基本要求　驱动电路必须具备隔离、保护和驱动放大三个主要功能。

（1）功率 MOSFET 位于高电位主电路中，而驱动电路位于低电位，因此一般需要电气隔离。

（2）应有一定的保护功能。

（3）驱动门极的控制信号幅值应满足 10～15V。功率 MOSFET 的门极与源极之间存在极间电容，故门极驱动必须提供该极间电容充放电所需的功率。对工作在兆赫兹的 MOSFET 驱动电路还要求：①驱动延迟时间小；②驱动峰值电流大；③栅极电压变化率 du/dt 大。

驱动电路隔离方法　有光隔离和磁隔离两种。

（1）光隔离：采用光耦合器，电路中每个功率 MOSFET 需要一个隔离电源，电路复杂，但开关很快，信号传播延时小。

（2）磁隔离：采用脉冲变压器，电路简单，对占空比很宽的脉冲信号进行耦合需要复杂的技术，信号频率较低时，变压器尺寸显著增加，寄生参数将会使快速开关波形畸变。

专用集成驱动电路　驱动电路技术发展很快，现已生产多种驱动 IC 芯片。自 20 世纪 90 年代以来，一种高性能的新型高压浮动 MOS 门极驱动器 IC 芯片投入使用，使得 MOS 功率器件的门极驱动更加完善和易于实现。新型组件能直接驱动低电位开关，而且因具有悬浮输出，故又能直接

驱动高电位开关。例如 IR2130 组件为六输出门极驱动器，在三相逆变电路中，用一片组件，一个+15V 直流电源就可同时驱动六个功率 MOSFET，使电路大为简化。它还具有以下性能：输出电阻值较小，门极极间电容可快速充放电，提高了功率器件开关速度，开关损耗低；在高频及最高允许工作电压下内部损耗较小。门极欠压、过压或负载电流超过预定峰值时，门极信号钳位于低电平，以保护功率开关器件。

集隔离、保护和驱动放大功能于一体的专用驱动集成电路已在很多应用场合替代了分立元器件组成的驱动电路。

绝缘栅双极型晶体管（IGBT）也属于门极电压驱动的功率器件，门极控制电路也适用于高电位的 IGBT。

gaoyajishu zhong de shuzi celiang xitong

高压技术中的数字测量系统 （digital measuring system used in the high-voltage field） 应用于高电压技术中的数字测量系统，包括数字存储示波器或数字记录仪。数字测量系统已在高电压测试领域得到了广泛的应用。可用于直流高电压的算术平均值及纹波、工频高电压及谐波等稳态量的测量，也用于冲击电压、冲击电流、气体绝缘金属封闭开关设备的暂态过电压等快速、短时间的暂态过程测量，断流容量试验、污秽放电试验等较慢速、长时间的暂态过程测量。此外还可检测局部放电等弱信号。在一次性的暂态过程测量时，由于数字存储示波器或数字记录仪具有“预触发”的功能，可以记录到触发前的信号，其优越性更为突出。

转换装置　为与数字测量系统的输入相适应，被测电压或电流信号需通过转换装置转换为适合于输入数字存储示波器或数字记录仪的低电压信号。经常应用的转换装置为分压器、分流器或罗戈夫斯基线圈，也可采用光电测量装置。对于某些弱信号测量，如局部放电的测量（见局部放电试验），转换装置中还应包括软、硬件滤波器、放大器等环节。

位数和采样率的要求　为满足有关高电压试验技术标准规定的测量准确度要求，对数字测量基本特性应作如下的选择：①位数 N。仅作冲击电压、冲击电流的峰值及波形测量时推荐用 8 位或以上；兼作比对试验时推荐用 9 位或以上。局部放电检测时，有可能要求采用 12 位。②采样率 f_s。其值按中国国家标准规定，应不低于 $30/T_x$，其中 T_x 为被测时间量。为此，在测量标准雷电冲击电压波形的波前时间时，要求 $f_s \geqslant 60\times10^6$ 采样数/s。应用于冲击试验时，数字记录仪不仅要进行静态特性的测试而且要进行多种动态特性的测试。

屏蔽措施　由于数字示波器（或记录仪）、计算机等都是弱电仪器，在高电压测试中必须采取金属屏蔽措施，应把它们置入金属屏蔽室或箱中，并应装设电源滤波器、隔离变压器。信号电缆宜采用双屏蔽同轴射频电缆并应有良好的接地措施（见高电压测试的抗干扰措施），否则测量到的信号波形会受到电磁干扰的影响，甚至会在测试过程中损坏仪器。

gaoyali qiti jichuan

高压力气体击穿 （electrical breakdown in highpressure gases） 在高气压的条件下，由于在电极间隙间施加高电压而引起的自持放电过程。在大气压下，均匀电场中，空气的电气强度约为 30kV/cm。采用高气压的空气或高电气强度的气体介质，可获得近于或超过普通液体或固体材料（如变压器油或电瓷）的电气强度。例如，在均匀电场中，为了承受 500kV 的电压，可采用气压约 2.9MPa、长度为 1cm 的空气间隙；采用气压约 0.8MPa、长度为 1.3cm 的 SF_6 气体间隙。

在高气压条件下，间隙中气体的数密度大，电子的平均自由行程较小，电子在自由行程中获得足够的能量使气体分子或原子电离的机会减小，即电离系数 α（见汤森放电理论）减小，削弱了气体中的电离过程，而使其电气强度增大。

在均匀电场中，在一定的气压范围内，间隙的击穿电压随气压成正比地增大，并遵守巴申定律：击穿电压只与气压 p 与极间距离 d 的乘积 pd 有关。在大的 pd 值下，试验结果和巴申定律有差异，击穿电压随气压而增加的陡度减小。从图 1 可看出，在同样的 pd 值下，气压高、间距小的间隙，其击穿电压较低。在高气压下，电极材料和电极表面状况对间隙的击穿电压有影响。不锈钢电极的击穿电压较高，而铝电极的击穿电压仅为不锈钢电极的 70%。新加工好的电极，击穿电压较低，经多次放电后，其击穿电压有所升高。电极经抛光、除油或电极表面覆盖绝缘层都会提高击穿电压。此外，较大的电极面积、尘埃、水分会使击穿电压有所降低。

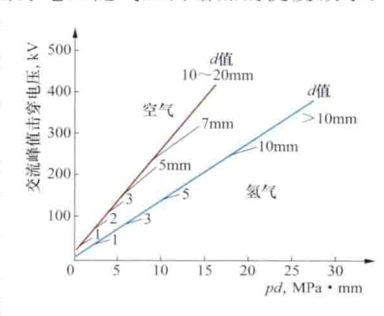


图 1　空气和氢气击穿电压与 pd 的关系

在不均匀电场中，高气压间隙的击穿电压下降较多，影响程度比大气压下的要大。在尖-板空气间隙上加直流电压，当尖为正极性时，会发生如图 2 所示的现象，即压力升高时，间隙的击穿电压会出现一个极大值。此外，在高气压下，湿度也会使间隙的击穿电压有较大的降低。

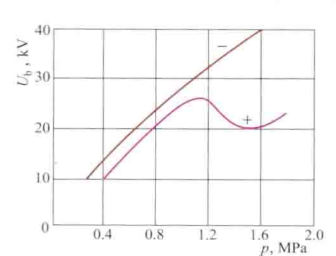


图 2　尖-板空气间隙中（极间距离 3mm，电极直径 0.25mm，头部磨圆），不同极性直流电压下，击穿电压与压力的关系

为了解释在高气压下，间隙的击穿电压并不随气压而成正比上升的现象，有人采用凸点模型对间隙的击穿电压进行计算。电极表面存在的一些凸点引起局部电场强度的提高，使电离系数 α 值加大，对电子崩和放电过程的发展更为有利，因而降低了间隙的击穿电压。有人观察到在高气压的 SF_6 气体间隙中，存在类似于真空击穿的现象，即电极表面的场致发射引发了整个间隙的击穿。

gaoya shiboqi

高压示波器 （highvoltage cathode-ray oscilloscope） 一种具有高加速电压，适用于观察和记录变化迅速的一次脉冲现象的阴极射线示波器。在高电压技术领域中，高压

示波器和转换装置——冲击分压器或分流器相配合，可以用来测量冲击电压或冲击电流的幅值和波形。高压示波器由示波管、光点释放装置、扫描装置、脉冲变换装置和电源五个部分组成。大多没有放大器环节，因而要求输入信号的电压幅值较高，常设有衰减器。优点是信噪比高、屏蔽效果好，抗干扰能力强。缺点是体积较大，不便观察，触发信号与被记录信号需要同步关系等。

由于高速数字示波器操作方便、灵敏度高，而且具有波形分析功能，已经逐渐取代了高压示波器。

gaoyuzhi luojimen

高阈值逻辑门

（high threshold logic gate） 一种阈值电压较高的双极型集成逻辑门电路，简称 HTL 电路。阈值电压是指门电路传输特性曲线中输出电压随输入电压改变而急剧变化时对应的输入电压。HTL 的主要优点是阈值电压比较高（一般为7～8V），所以噪声容限比较大，抗干扰能力较强。但它的输入部分是二极管结构，所以速度较低。这种电路适用于对电路的速度要求不高、但抗干扰能力很高的各种工业控制设备中。

geli fangdaqi

隔离放大器

（isolation amplifier） 能绝缘隔离信号与测量电路之间高电位差的一种弱信号放大电路。变压器耦合和光电耦合是两种最常用的隔离放大器。

变压器耦合隔离放大器 原理框图如图 1 所示。u_i为传感器的输出信号，接到前置放大器 N 的同相输入端与输入信号“地”之间。输入信号“地”与输出信号u_o的“地”之间有时存在着较高的电位差，可达千伏级。u_i经前置放大器放大后，再经调制器、变压器 T1 和解调器后输出。所以变压器 T1 负担信号的传输和电位隔离。但是，前置放大器 N 和调制器都需要一定功率的电源，这个电源（直流）是从+15V电源侧经过振荡器、变压器 T2 和整流滤波后获得的，所以 T2 负担电功率的传输和电位隔离。T2 和 T1 上边的箭头指向分别代表功率流向和信号流向。通常在隔离放大器后，接测量放大器。

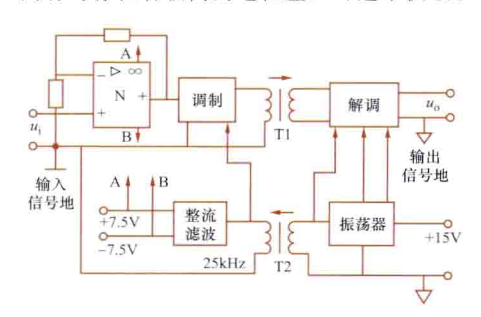


图 1 变压器耦合隔离放大器原理框图

光电耦合隔离放大器 电路原理图如图 2 所示。运算放大器 N1 组成输入放大器，运算放大器 N2 组成输出放大器，光电耦合器 V1 和 V2 特性完全一致，V1 完成输入与输出放大器之间的信号传递及电气隔离任务，输入回路与输出回路分别有独立的电源和地。光电耦合器 V2 作为 N1 的非线性反馈支路来弥补 V1 的非线性，且两个发光二极管串联在同一支路，两个光敏三极管（见光电三极管）集电极电流相等，设电阻$R_1=R_4$、电压$U_{CC1}=U_{CC2}$，则有两个光敏三极管集电极电位相等，从而实现u_o与u_i相等的信号传输。一般光电耦合器工作速度比运算放大器低得多，电路中采用电容 C（通常取 1500pF）来改善电路的频率特性，该电路的线性度可达到 0.1%，频带可达 0～40kHz。

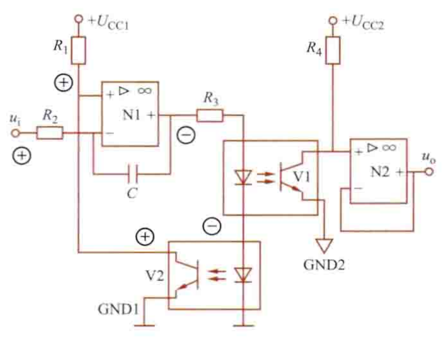


图 2 光电耦合隔离放大器电路原理图

genguijifa

根轨迹法

（root locus method） 利用根轨迹分析和设计闭环控制系统的图解方法。闭环控制系统特征方程的根，随系统某个参数由零变到无穷大时在复数平面上形成的轨迹，称为根轨迹。在控制系统的分析中，对特征方程根的分布的研究，具有重要的意义。

闭环控制系统的动态响应指标（响应时间、超调量等）是由闭环极点决定的。因此，在分析控制系统时，闭环极点在 s 平面（即复平面）上所处的位置至关重要。在设计控制系统时，可通过改变闭环极点在 s 平面上的位置来满足对系统动态响应的要求。求闭环极点，就是求特征方程的根。当特征方程式的次数大于 3 时，求根是相当复杂的。特别是研究系统参数变化对闭环特征方程式根的影响时，需要进行大量的反复计算，而且还不能直观地看出参数变化对系统动态响应影响的趋势。

根轨迹法是为了避免直接求解高次方程式的困难而提出的一种图解求根法。当系统的开环增益或其他参数改变时，特征方程式亦随之改变，所有这些特征方程式的根均可在根轨迹图上简便地确定。在根轨迹法中，通常取开环增益（或称开环放大系数）作为上述可变参数，并使它在其全部变化范围内变化，即从零变化到无穷大。采用开环传递函数的其他任何变量作为可变参数，也是完全可以的。

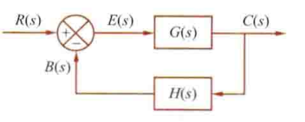


图 1 控制系统框图

根轨迹原理 图 1 为控制系统框图，其开环传递函数为

$$G(s)H(s)=\frac{KN(s)}{D(s)}=\frac{K(s^m+b_1s^{m-1}+\cdots+b_m)}{s^n+a_1s^{n-1}+\cdots+a_n}=\frac{K\prod_{i=1}^{m}(s+Z_i)}{\prod_{j=1}^{n}(s+P_j)}$$

式中 $N(s)$ 和 $D(s)$ 为复变量 s 的多项式，$m\leqslant n$，K 为系统的开环增益，$-Z_i$ 为系统的开环零点（另有$n-m$个开环零点在无穷远处），$-P_j$ 为系统的开环极点。控制系统的闭环传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}=\frac{G(s)D(s)}{D(s)+KN(s)}$$

系统的闭环极点是下列特征方程式的根

$$D(s)+KN(s)=0$$

闭环系统特征方程式的又一形式为

$$1+G(s)H(s)=0$$

亦即

$$G(s)H(s)=-1$$

根据等号两边的幅角和幅值应分别相等的原则，可将上式分开写成两个方程，即

幅角条件

$$\angle G(s)H(s)=\sum_{i=1}^{m}\angle(s+Z_i)-\sum_{j=1}^{n}\angle(s+P_j)$$
$$=\pm 180^\circ\times(2k+1)(k=0,1,2,\cdots)$$

幅值条件

$$|G(s)H(s)|=\frac{K\prod_{i=1}^{m}|s+Z_i|}{\prod_{j=1}^{n}|s+P_j|}=1$$

满足幅角条件和幅值条件的 s 值，就是闭环系统特征方程式的根，也就是系统的闭环极点。幅角条件用来确定 s 平面上所有属于根轨迹的点，而幅值条件用来计算根轨迹上给定点所对应的开环增益 K 值，或是由给定的开环增益 K 值确定对应的闭环极点。

根轨迹图的绘制　绘制根轨迹图时，并不需要在 $s=\sigma+j\omega$ 平面上找很多点描绘它的精确曲线，而只需根据根轨迹上的特殊点和渐近线，算出复数开环极点的出射角和复数开环零点的入射角等，作出根轨迹的近似曲线。找出以下特征，可使绘制根轨迹图的过程显著简化。

（1）根轨迹的分支数，根轨迹的起点和终点。当开环增益 K 从零变化到无穷大时，特征方程式的每个根可以描绘出一条连续曲线，它就是根轨迹的一个分支。根轨迹的分支数与特征方程式根的数目相同。根轨迹的每一分支，从一个开环极点出发，终止于一个有限的开环零点或趋向于无穷远处的开环零点。

（2）实轴上的根轨迹。实轴上右方的开环实数极点和实数零点（有限的而不是无穷远处的）的总数为奇数的线段为根轨迹。

（3）根轨迹的渐近线。当开环极点数 n 大于开环（有限）零点数 m 时，有（$n-m$）条根轨迹分支分别沿着与实轴交角为 β、交点为 σ_a 的渐近线趋于无穷远处。

$$\beta=\frac{(2k+1)\times 180^\circ}{n-m}(k=0,1,2,\cdots,n-m-1)$$

$$\sigma_a=\frac{\sum_{j=1}^{n}P_j-\sum_{i=1}^{m}Z_i}{n-m}$$

（4）根轨迹的分离点和会合点。如果实轴上的根轨迹线段位于两个相邻的开环极点或两个相邻的开环零点之间，则这样的线段是分别属于两个分支的。两个开环极点之间必有一个分离点，两个开环零点之间必有一个会合点。分离点或会合点在实轴上的位置（即坐标 σ_b）可通过求解方程 $\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\sigma_b+P_j}=\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{\sigma_b+Z_i}$ 而得。

（5）偏离角。即根轨迹离开复数开环极点的出射角或到达复数开环零点的入射角。借助幅角条件可以方便地确定偏离角的大小。

（6）根轨迹与虚轴的交点。若根轨迹与虚轴相交，则可令特征方程式中 $s=j\omega$，然后再分别使实部和虚部等于零，求出交点的 ω 值和 K 值。

根轨迹的最重要的部分是靠近虚轴和原点的部分，必须把这一部分画得精确些。有了控制系统的根轨迹，就可以根据已知的 K 值确定闭环系统的极点，从而知道系统的性能；反之，根据对系统性能的要求，确定所需的极点分布，也可以求出相应的 K 值或采取必要的措施。

例如，系统的开环传递函数为 $G(s)H(s)=\frac{K}{s(s+2)(s+4)}$，要求作根轨迹图。步骤如下。

（1）求根轨迹的分支数。开环极点为 0，-2，-4，开环零点在无穷远处，根轨迹有三个分支。

（2）确定实轴上的根轨迹。实轴上 0 与 -2 之间、-4 与 $-\infty$ 之间是根轨迹线段。

（3）求根轨迹的渐近线。有三条根轨迹的渐近线，与实轴的交角分别为

$$\beta=\frac{(2k+1)\times 180^\circ}{3-0}$$
$$=60^\circ,180^\circ,300^\circ(k=0,1,2)$$

与实轴交点的坐标为 $\sigma_a=\frac{(0-2-4)-0}{3-0}=-2$。

（4）求根轨迹的分离点。由方程 $\frac{1}{\sigma_b+0}+\frac{1}{\sigma_b+2}+\frac{1}{\sigma_b+4}=0$，求得分离点 $\sigma_b=-0.845$。

（5）求根轨迹与虚轴的交点。将 $s=j\omega$ 代入特征方程式

$$j\omega(j\omega+2)(j\omega+4)+K=0$$

令上式中虚部和实部分别为零，则

$$-j\omega^3+j8\omega=0$$

得 $\omega=\pm 2.828$，这是交点 ω 值。

又由 $-6\omega^2+K=0$ 得 $K=48$，这是交点开环增益。所作根轨迹图示于图 2。

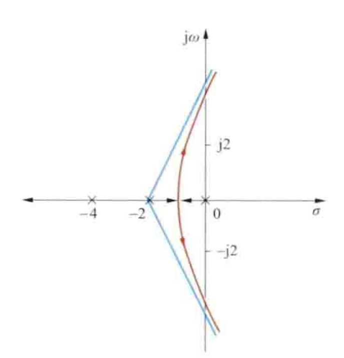


图 2　根轨迹图

gongcheng gongzuozhan

工程工作站　(engineering workstation)　具有相当强的计算能力和图形处理能力，并能联网使用的计算机系统，简称工作站。它将图形显示和处理技术，特别是三维图形技术以及实时快速图形加速器技术与高速计算功能集于一体，不仅广泛应用于各行各业的计算机辅助设计、计算机辅助制造、计算机辅助工程与仿真、计算机辅助软件工程、人工智能和专家系统、科学计算可视化和虚拟现实技术，而且还扩展到商业领域和管理信息系统领域，甚至波及文化娱乐领域（商业广告、动画片的制作等）。它是 20 世纪 90 年代计算机工业的一种主流产品。

工程工作站（见图）是 20 世纪 80 年代初出现的机种，传统上采用“5M”来描述工程工作站，即：①具有一兆像素（megapixel）以上的图形显示和处理功能；②具有一兆字节（megabyte）以上的主存储器；③运行多进程操作系统



工程工作站

(multiprocessing OS)；④具有每秒一兆指令（million instructions per second，MIPS）以上的运算速度；⑤具有传输速率为一兆位（megabit）以上的局域网能力。超大规模集成电路和计算机技术的飞速发展，尤其是精简指令集计算机（reduced instruction set computer，RISC）性能的成倍上升，5M的指标早已经被打破。

工作站区别于普通计算机的最大特点是它具有强大的图形功能，采用专用的图形硬件来完成图形处理，在高档的工作站中，甚至采用多处理器结构的图形专用硬件来完成图形处理任务。

工作站根据软、硬件平台的不同，一般分为基于RISC架构的Unix系统工作站和基于Windows、Intel的PC（personal computer）工作站。Unix工作站是一种高性能的专业工作站，具有强大的处理器和优化的内存、输入/输出（I/O）、图形子系统，使用专有的处理器（Alpha、MIPS、POWER等）、内存以及图形等硬件系统，专有的Unix操作系统，针对特定硬件平台的应用软件，彼此互不兼容。PC工作站是基于高性能的X86处理器之上，使用Linux、Mac OS、Windows NT及Windows 2000、Windows 2003、Windows 2008等操作系统。采用符合专业图形标准（OpenGL）的图形系统，再加上高性能的存储、I/O、网络等子系统，来满足专业软件运行的要求。

gongpin shiyan bianyaqi

工频试验变压器　(power frequency testing transformer)　产生试验用工频交流高电压的电源装置。该装置常用于进行各种工频高电压试验，也可作为直流高电压发生器、冲击电压发生器、冲击电流发生器的交流高压电源以及串联谐振装置的励磁电源。使用时需配上调压器、保护电阻、测量系统及低压侧控制系统。原理接线如图1所示，保护电阻R_1可阻尼因试品闪络或击穿引起的过电压，以保护试验变压器，阻值为数千欧姆至数万欧姆。

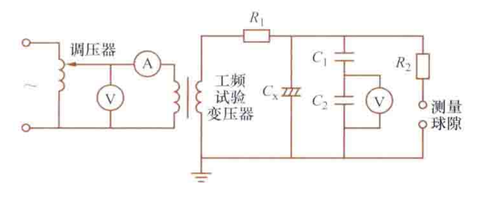


图1　工频试验装置原理图

R_1、R_2—保护电阻；C_x—试品；C_1、C_2—电容分压器

工频试验变压器的基本技术参数为额定电压U、额定电流I或容量P。中国国家标准《高电压试验技术　第一部分：一般定义及试验要求》(GB/T 16927.1—2011)规定：试验变压器输出电压的频率为45～55Hz，波形应接近正弦，两个半波应完全一样，且峰值与有效值之比等于$\sqrt{2}\pm0.05$。进行工频高压试验时，试品相当于电容负载C_x。由于C_x的电容效应，会使实际输出电压比其低压侧电压表读数乘以变比所得值要大，故应在C_x上并接测量装置（例如电容分压器）方能准确测得C_x上的电压值。由C_x值可选择试验变压器的容量P，即$P=\omega C_x U^2\times10^{-9}$（$P$，kVA；$C_x$，pF；$U$，kV）。中国国家标准中还规定了工频试验装置在进行各类闪络试验时，应供应的短路电流值。

和电力变压器相比，其主要特点是：①电压高，额定电流I小（一般I为0.1～4A）；②持续工作时间短，温升较低，没有复杂的冷却系统；③在额定电压下对局部放电量有较严格的要求；④短路阻抗较大。

单台工频试验变压器的额定电压一般小于或等于750kV。为得到更高电压，可选用由2～3台试验变压器串接而成的串级试验变压器（见图2、图3）。其优点是制造、运输、安装方便，使用灵活，可数台并联使用或改成三相式接线，可以只使用其中部分变压器以提供较低的试验电压，还可以每台变压器分开单独使用以增加工作地点；缺点是总短路电抗大，整个装置的容量利用率低，发生过电压时，各级间瞬态电压分布不均匀。



图2　2×750kV、3000kVA户外工频试验变压器



图3　2×500kV、2000kVA户内工频试验变压器

常用的调压器有自耦调压器和移圈式调压器。前者的优点是漏抗小，变压器输出波形好；缺点是分级式调压，容量有限。后者的优点是调压均匀，容量大，大型试验变压器多选用它作调压设备；缺点是漏抗大，致使变压器输出波形畸变，必要时需加滤波装置以改善波形。电动发电机组是最理想的调压设备，但价格贵而运行复杂，多在对试验要求较高的实验室内使用。

gongzuoliu jishu

工作流技术　(workflow technology)　一种能够被计算机解释和执行的反映经营过程业务流程的计算机化模型技术。在业务流程中，文档信息或任务按照预定的规则，以

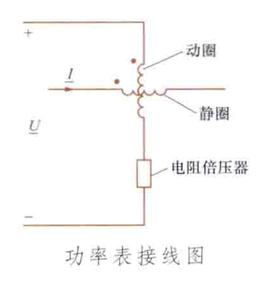
计算机网络为载体流转，实现组织成员间的协调工作以达到业务的整体目标或是促使目标的实现。工作流技术通过将工作分解成定义良好的任务或角色，按照一定的规则和过程来执行这些任务并对其进行监控，达到提高工作效率、更好地控制过程、增强对客户的服务、有效管理业务流程等目的。

能定义、创建和管理工作流执行的软件系统被称为工作流管理系统。一个完整的工作流管理系统通常包括工作流引擎、可视工作流设计、流程操作、工作流客户端程序、流程监控、表单设计工具、与表单的集成以及与应用程序的集成八个部分。

gonglü biao

功率表 (wattmeter) 测量直流、交流功率量值的电表。包括电动系、铁磁电动系、静电系、热电式、霍耳效应式和电子式功率表。电子式功率表又可分为脉宽调制式、变互导式、双斜积分式、对数式、四分之一平方式、采样数字式。适用于测量射频、微波及毫米波频段功率的功率表，常被称为功率计。

对于电动系功率表，令被测电流通入电动系测量机构（见机械式指示电表测量机构）的静圈，被测电压经电阻倍压器变换成与电压成正比的小电流通入动圈（见图）。静圈激励的磁场与动圈中的电流相互作用产生转矩，使动圈和固定于其上的指针一起偏转。对于直流，偏转角正比于被测电流与电压的乘积，对于交流，偏转角正比于被测电流、电压的有效值与功率因数的乘积，即正比于被测的直流或交流功率。



功率表接线图

图中，静圈和动圈标有黑点“•”的接线端称为极性端。其作用有：①当此两端接在同一根电源线上时，静圈与动圈间的电位差很小，工作安全；②这种接线方式下，如指针正向偏转，表示电能由标有极性端的一方流入。

为提高准确度和扩大频率使用范围，电动系功率表在制作上采取以下措施：①在部分电阻倍压器上并接电容器或在动圈上并接电感器，以补偿动圈电感引起的相角误差和频率误差；②为减小外磁场影响，在测量机构上加装磁屏蔽或采用无定位测量机构；③静圈固定支架尽可能不用金属，以免产生涡流；④指示器不用指针而用光标，以减小视差。

电动系功率表的量程一般由数十毫瓦至数千瓦，附加测量互感器后可扩展至数百兆瓦。它能测量直流功率和交流功率，可较准确测量交流功率的频率范围是数十赫至数千赫。在测量数百赫以下的功率时，受谐波影响小。

选用功率表时，应指明其电压和电流量程。一般功率表刻度盘是按电压量程、电流量程及功率因数为1三者相乘的结果刻度的。而低功率因数功率表，则按电压量程、电流量程以及功率因数为0.1或0.2三者相乘来刻度。

为测量三相功率，可利用电动系测量机构制成三相功率表。在不对称三相三线系统中，可使用由两组测量机构制成的三相两元件功率表。在不对称三相四线系统中，要采用三相三元件功率表。在对称三相系统中，可使用三相单元件功率表，即只用一个测量机构，但该功率表按三相功率值标度（见功率测量）。

gonglü celiang

功率测量 (electric power measurement) 单位时间内电能量值的测量。功率的单位是瓦（W）。按被测对象的不同，可分为直流功率、单相交流功率及三相交流功率等的测量。

直流功率测量 直流电路的功率为 $P=UI$。其中 U 为被测电路端口的电压；I 为流经该电路的电流。要实现功率测量，可采用间接法或直接法。

间接法 用直流电压表、电流表分别测出 U、I，将两者相乘得到 P；具体测量时要注意电压表、电流表的接法（见电阻测量）。若已知负载的等值电阻 R，则可按公式 $P=I^2R$ 或 $P=U^2/R$，由 R 值及测得的 I 或 U 值计算出功率。

直接法 利用具有乘法功能的功率表直接测量功率。其接线如图1所示，W为功率表。同间接法有两种接法一样，功率表的电压线圈支路、电流线圈支路在电路中也有两种接法，分别适用于不同的负载等值电阻情况。

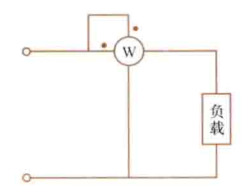


图1 用功率表直接测量功率

单相交流功率测量 单相交流电路的功率 $P=UI\cos\varphi$，其中 U 和 I 分别为被测电路端口正弦电压和流过该电路正弦电流的有效值，φ 是上述电压与电流间的相角差。单相交流功率也可用间接法测量，即用交流电压表、电流表、功率因数表分别测得 U、I、$\cos\varphi$ 后，将三者相乘得到功率。但此法接线较复杂，误差较大。一般常使用功率表直接测量功率，功率表的接法与图1相同，但一般同时还应接电压表和电流表，以监测电压值和电流值。

三相交流功率测量 三相交流电路可分为三相四线系统和三相三线系统。

三相四线系统功率的测量 不管负载是否对称，均采用三块功率表来测量，其原理接线如图2所示，图中标有黑点“•”者为极性端。三块功率表测得的分别是A、B、C三相的功率，将三者相加得到三相系统的总功率。

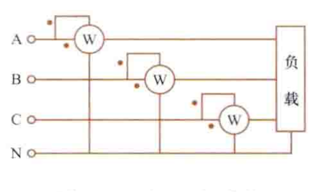


图2 三相四线系统功率的测量

三相三线系统功率的测量 不管负载是否对称，均可采用两块功率表实现测量，其原理接线如图3所示。两功率表的电流线圈可分别接入A、B、C相三条线的任意两条线中，但要注意，电压线圈支路及极性端的相应接法。两功率表读数之和就是该三相系统的总功率。

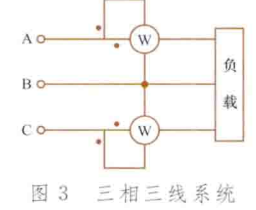


图3 三相三线系统功率的测量

根据上述测量原理也可制成三相功率表。方法是将三个或两个功率测量机构装设于同一表壳内，且其动圈固定在同一转轴上，这样就形成了四线制或三线制的三相功率表，配合相应的刻度盘，可直接读出三相系统总功率的值。

gonglü erjiguan

功率二极管 (power diode) 由一个 PN 结或一个半导体-金属结构形成的电力半导体器件，属于不可控器件。与普通的二极管相比，其工作原理基本相同，主要差别是功率二极管的 PN 结面积更大，能流过较大电流，因此功率容量要比普通二极管大很多。它的工作原理简单、使用方便、可靠性高，在电力电子及灵活交流输电装置中，被广泛应用于整流、吸收及续流等电路中。近年来新型电力半导体器件涌现，对与之配合的功率二极管的要求也在迅速发展，由此派生出了许多类型，如结型功率二极管、功率齐纳二极管、肖特基势垒二极管、快恢复二极管等。

结型功率二极管　利用 PN 结构成的功率二极管，结构示意图见图 1。它采用 $P^+P^-N^-N^+$ 结构扩散工艺制成。其参数包括：①正向平均电流；②正向峰值电压；③反向重复峰值电压；④动态峰值电压；⑤反向恢复时间；⑥反向恢复电荷；⑦浪涌电流；⑧二极管电容。用于整流的普通结型功率二极管的参数范围为：正向平均电流 1～4800A，反向重复峰值电压 25～5000V。

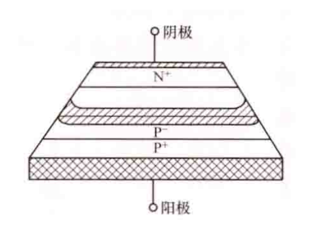


图 1　结型功率二极管结构示意图

功率齐纳二极管　能够承载较大功耗的齐纳二极管，通常耗散功率在 250mW 到 100W 以上。当给一个 PN 结上施加反向电压时，在零和某个电压之间反向电流一直很小；但当外加电压超过该电压值，反向电流即会突然迅速增大。此电压称为转折电压。超过转折电压后的伏安特性称为击穿段，其特点是电压变化极小的量，电流即会相应地出现极大的变化，基本上可以把该段的电压视为接近恒值。因此，运用 PN 结特性击穿段构成的功率齐纳二极管被广泛用作电压参考源和电压钳位。这种器件的转折电压范围可由几伏到 280V。

肖特基势垒二极管　利用金属-半导体接触的正反导电非对称性制成的二极管，结构如图 2 所示。它是以 N 型半导体为基片，在上面形成用砷作掺杂剂的 N^- 外延层。阳极使用钼或铝等材料制成阻挡层。用二氧化硅来消除边缘区域的电场，提高二极管的耐压值。在基片下边形成 N^+ 阴极层，其作用是减小阴极的接触电阻。通过调整结构参数，N 型基片和阳极金属之间便形成肖特基势垒。当在肖特基势垒两端加上正向偏压时，肖特基势垒层变窄，其内阻变小；反之，肖特基势垒层变宽，其内阻变大。

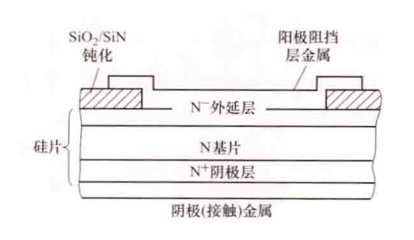


图 2　肖特基二极管结构示意图

与结型功率二极管比较，肖特基二极管的反向恢复时间较短，只有前者的千分之一；正向通态电压较低，只有前者的二分之一；工作结温较高，可达 175℃。这种器件的反向电压只能达到 400V。运用新材料研制出的碳化硅肖特基整流二极管阻断电压超过 5000V，大电流器件通态电流达 130A。

快恢复二极管　反向恢复时间短、开关特性好的二极管。其参数范围为：正向平均电流 3～2000A，反向重复峰值电压 25～4000V，反向恢复时间 0.5～15μs。由于在制造过程中采用特殊工艺，使其开关速度远远高于普通的二极管，且反相恢复的电流下降率（di/dt）小，具有软恢复特性。广泛用于各种高频器件如 IGBT、MOSFET 的续流、缓冲和保护电路中。器件在耐压、恢复特性、正向通流能力等各项参数之间难以同时兼顾，快恢复二极管的功率容量远不及普通的功率二极管。

gonglü fangda dianlu

功率放大电路 (power amplifier) 以增强输出信号功率为主要目的的放大电路，简称功放。它常作为多级放大电路的末级，向负载提供所需功率，其负载可以是扬声器、电动机、继电器、电热器、发送天线等。功率放大电路的主要性能指标是最大输出功率、效率和非线性失真系数。效率是指放大电路的有用输出信号功率与所消耗的直流电源功率之比。

在大功率放大电路中，由于热损耗大，在结构上发热严重的有源器件往往要外加散热器（传导冷却、辐射冷却）以降低器件温升，有的大功率器件还必须使用风冷、水冷或蒸发冷却装置。为防止工作过程中温升过高，有的大功率放大电路中装有热过载保护继电器。

功放所用的有源器件主要是晶体管（双极型晶体管或场效应晶体管）和集成功率放大器，少数场合下（如高频或微波大功率发射机末级）也用电子管。晶体管的最大输出功率在较低频段已能达到数十千瓦，电子管可达兆瓦级，集成功率放大器的最大输出功率已达数百瓦。

功放电路有多种，常用的有单管功放电路、单电源互补对称功放电路、双电源互补对称功放电路和高频功放电路等。

单管功放电路　电路如图 1 所示。它与电压放大电路在形式上相似，主要的差别是静态工作点须适应输出最大不失真功率的要求，一般选择静态工作点在交流负载线中点。为获得较大功率输出，在它的输出端常用变压器耦合，使负载阻抗达到最佳值。它工作于甲类状态。在不使正弦波信号输出有明显失真的条件下，这种功放电路的最大理论效率为 50%。它一般只用于功率不大的场合，例如晶体管收音机的小功率输出级。

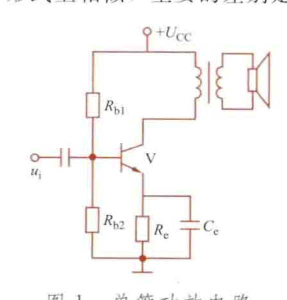


图 1　单管功放电路

单电源和双电源互补对称功放电路　单电源互补对称功放电路如图 2 所示。双电源互补对称功放电路如图 3 所示。在这两种功放电路中，两个晶体管都要用 PNP 型和 NPN 型双极型晶体管，或 N 型沟道和 P 型沟道场效应晶体管组成，且要求两个管子特性相同，以构成互补对称特性。两种功放电路都可减小静态工作点电流，使之趋近于零（称之为甲乙类放大电路），而不致失真过大，故其效率较高，乙类功放电路的最大效率为 78%，它的实际效率约为 60%，输出功率也较大。在图 2 电路中，其输出端不用变压器耦合，而用电容耦合，故常称之为无输出变压器（output transformer less，OTL）电路。耦合电容 C 用来隔离直流，两端电压 U_C

近于$U_{CC}/2$，其极性左正右负，它为晶体管V2提供了负电源。若采用极性一正一负的两组电源（如图3），还可以免去图2中的耦合电容，图3电路称为无输出电容（output capacitor less，OCL）电路。若采用使两组单电源互补对称功放电路并接成桥式（bridge tied load，BTL）结构（见图4），则输出直流电位也可抵消，并且减少一组电源。

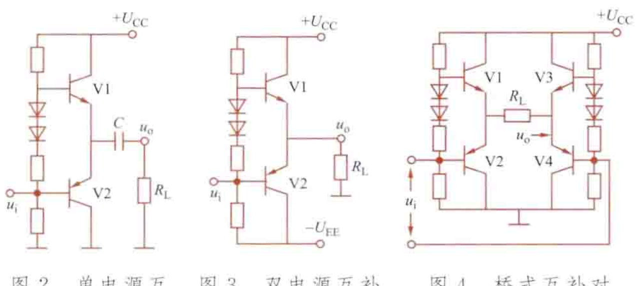


图2 单电源互补对称功放电路　图3 双电源互补对称功放电路　图4 桥式互补对称功放电路

高频功放电路　专门用来放大窄频带射频信号的功率放大电路。它允许电流波形有很大失真，然后利用调谐电路抑制谐波。为了尽量提高效率，可把电路的静态工作点偏置到截止点以下（称为丙类放大电路）。

gonglü yinshu

功率因数

（power factor）　有功功率和视在功率之比。旧称力率，常采用的符号是$\cos\varphi$、λ或pf（由英文power factor首字母构成的缩略语）。令P代表有功功率，Q代表无功功率，S代表视在功率，则功率因数$\cos\varphi$为

$$\cos\varphi=\frac{P}{S}=\frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}$$

在正弦交流电路中，φ为二端网络电压和电流之间的相位差角，通常称φ为功率因数角。相位差越大，功率因数越低。当电压和电流同相时功率因数等于1；当电压和电流的相位差等于90°时功率因数等于零。

在三相负载中，从技术上看，主要由于电流和电压之间有相位差、波形偏离正弦波发生畸变和三相不对称等因素导致功率因数降低。实际上功率因数也是随着电力负载的波动而变化的。常用下式来代表每日或每月的平均功率因数

$$\cos\varphi=\frac{W_P}{\sqrt{W_P^2+W_Q^2}}$$

式中W_P是每日（或每月）由有功电能表测出的有功电能量千瓦小时数；W_Q是每日（或每月）由无功电能表测出的无功电能量千乏小时数。

在一般的情况下功率因数小于1。只有在有功功率等于视在功率时，功率因数才等于1。为了充分利用和发挥电工设备的能力，在运行时尽可能使有功功率接近视在功率，或使功率因数接近1。供电部门通常要求高压供电的用户的功率因数不得低于0.9。为使电费计算公平合理，对功率因数低的用户实行罚款，促使功率因数低的用户进行无功补偿以提高功率因数。

gonglü yinshu biao

功率因数表

（power factor meter）　测量正弦交流电路中有功功率与视在功率的比值，或测量正弦电压、电流间相角差余弦的电表。具体有电动系、铁磁电动系、电磁系和变换器式功率因数表。

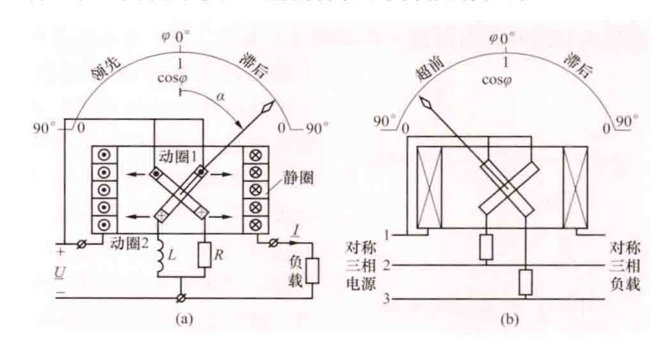
电动系单相功率因数表的接线如图（a）所示，负载电流$\dot{I}$通过静圈，两个互成直角装设的动圈1和动圈2分别串联电阻R及电感L（或电容C）后，并联到负载电压$\dot{U}$上。动圈1和静圈组合，产生与有功功率和偏转角α的正弦的乘积成正比的力矩M_1，即$M_1=KUI\cos\varphi\sin\alpha$，式中$\varphi$为功率因数角，$K$为常数。动圈2与静圈组合，产生与无功功率和偏转角$\alpha$的余弦的乘积成正比的力矩，即$M_2=KUI\sin\varphi\cos\alpha$。此测量机构又称电动系流比计。

负载为纯电阻时，$\varphi=0°$，$M_1=KUI\sin\alpha$、$M_2=0$。该表计的可动部分在M_1作用下，使指针偏转到$\alpha=\varphi=0°$即$\cos\varphi=1$的标度处。

负载为纯电感时，$\varphi=90°$，$M_1=0$、$M_2=KUI\cos\varphi$。该表计的可动部分在M_2作用下，使指针顺时针偏转到$\alpha=\varphi=90°$，即$\cos\varphi=0$的标度处。

同理，负载为纯电容时，由于静圈中的电流及力矩M_2改变了方向，表计可动部分在M_2作用下，使指针逆时针偏转，停留在$\alpha=\varphi=90°$，即$\cos\varphi=0$的标度处。

功率因数表的标度尺可按φ角或功率因数$\cos\varphi$来分度，其“零点”（即$\cos\varphi=1$的点）选择在标尺中间；指针右偏转，表示负载为感性；左偏转表示负载是容性的。



电动系功率因数表原理接线

（a）单相功率因数表；（b）三相功率因数表

单相功率因数表还可用来测量中点可引出的对称三相电路的功率因数，此时该表计的电压支路应接相电压。当对称三相电路的中性点不可及时，可采用三相功率因数表进行测量，如图（b）所示。使用三相功率因数表时要特别注意，除应按说明书中的规定接线外，还应注意相序关系，不能接错。

gonglü yinshu celiang

功率因数测量

（power factor measurement）　正弦交流电路中，相电压与相电流（也可以是二端口的端电压与端电流）间相角差φ的余弦值$\cos\varphi$的测量。可分为单相正弦交流电路和三相正弦交流电路功率因数的测量。

单相电路的功率因数测量　有三表法、功率因数表法和相角换算法等。

三表法　单相正弦交流电路中，功率$P=UI\cos\varphi$，即功率P等于相电压U、相电流I及两者间相角差φ余弦值的乘积。用电压表、电流表、功率表分别测量出U、I、P，再按$\cos\varphi=P/(UI)$计算出功率因数。若不能同时读出三表的示值，则误差可能较大。

功率因数表法　用功率因数表可直接测量出正弦交流电

路的功率因数。

相角换算法　由 φ 与 $\cos\varphi$ 的函数关系，可用某相角测量法先测出 φ，再换算出 $\cos\varphi$ 值。

三相电路的功率因数测量　针对不同对象，要采用不同的测量方法。

对于三相电路的某一相，功率因数的测量方法同单相电路。

对于三相电路，功率因数的定义为 $\cos\varphi=P/S$，$P=P_A+P_B+P_C$ 为三相总功率，$S=U_AI_A+U_BI_B+U_CI_C$ 为三相的总视在功率。对于对称三相电路，$\cos\varphi=P/(3UI)$ 或 $\cos\varphi=(P/3)/(UI)$，$P/3$、U、I 分别为每相的功率、电压和电流，其功率因数的测量方法同单相电路。对于不对称三相电路，可用电压表、电流表分别测出各相的电压 U_A、U_B、U_C 和电流 I_A、I_B、I_C，即可求出 S，然后用功率表测得 P，再由公式 $\cos\varphi=P/S$ 求出 $\cos\varphi$。

对于负载和功率因数随时间变化的交流电路，一段时间内的平均功率因数值被定义为：$1/\sqrt{1+(\text{无功电能值}/\text{有功电能值})^2}$。可使用电能表和无功电能表读出这段时间内消耗的有功电能和无功电能，再按上式算出功率因数。

gongji fangda dianlu

共基放大电路　(common-base amplifier)

基极是输入回路和输出回路公共端的放大电路。图1所示是最简单的晶体管共基放大电路，其中晶体管为NPN型；R_e 称偏置电阻，用来给晶体管提供合适的偏置电流；R_c 称集电极电阻，用来提取放大了的信号电压；C_1 和 C_2 称耦合电容，对交流信号起耦合作用，同时也有隔直流的作用。

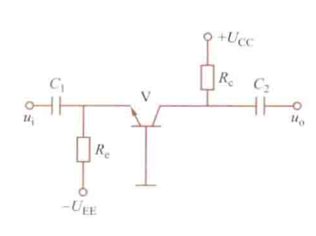


图1　共基放大电路

共基放大电路中输入信号加在晶体管的射极和基极之间，输出信号从晶体管的集电极和基极间取出，基极为输入回路和输出回路所共用。

共基放大电路的电流放大倍数略小于1，而电压增益、功率增益可以很大，其输入电阻比共射放大电路和共集放大电路都小，而输出电阻又比它们都大。由于其输出电阻很大，常用作恒流源电路；由于其输入电阻小，输入电容也小，故常用于高频放大电路，例如图2所示的共射-共基组合放大电路。共基极电路常作为高频、视频共射极电路的后级电路，由于后级的共基放大电路的输入电阻很小，它接在共射放大电路的集电极上，使共射放大电路的交流负载电阻变小，从而使晶体管V1的集电结电容 $C_{b'c}$ 折算到输入回路的等效电容（即密勒电容）比较小，使第一级的频带加宽。而对第二级的共基放大电路来说，因基极是公共端，故 $C_{b'c}$ 的作用仅作为输出电容，而不影响输入电容，比共射放大电路要小得多，也就是说共射-共基放大电路总的频带比共射-共射放大电路要宽。

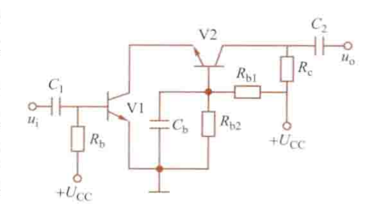


图2　共射-共基组合放大电路

gongji fangda dianlu

共集放大电路　(common-collector amplifier)

集电极是输入回路和输出回路公共端的放大电路。图1是最简单的晶体管共集放大电路，其中晶体管为NPN型；R_{b1} 和 R_{b2} 称偏置电阻，用来给晶体管提供合适的偏置电流；R_e 称射极电阻，用来提取信号电压；C_1 和 C_2 称耦合电容，对交流信号起耦合作用，同时也有隔直流的作用。

共集放大电路中输入信号加在晶体管的基极和集电极之间，输出信号从晶体管的射极和集电极间取出，集电极为输入回路和输出回路所共用。

共集放大电路的电压放大倍数略小于1，也就是输出电压和输入电压大小很接近，且输出电压和输入电压的相位相同（忽略该电路中的电容效应），故该放大电路常称为射极跟随器或射极输出器。该电路虽然没有放大电压，但其电流放大倍数、功率放大倍数是远大于1的。它的特点是：输入电阻很大，比共射放大电路大；输入电容很小，远比共射放大电路小，在多级放大电路中常作输入级用；输出电阻很小，远比共射放大电路小，故在多级放大电路中又常作输出级用。由于其输入阻抗大，输出阻抗小，具有阻抗变换的作用，故在多级放大电路中常作为隔离级或缓冲级。图2所示电路是常用的共射-共集组合放大电路。由于共集放大电路输入电阻大，输入电容小，接在共射放大电路后面可以减轻后级的输入电容对前级共射放大电路的影响，以改善高频特性。此外，共集放大电路的输出阻抗小，可以承受较重的负载，而且由于输出电阻很小，使得输出端的负载电容对整个电路高频特性的影响也较小。

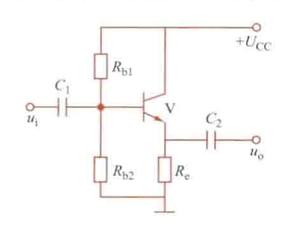


图1　共集放大电路

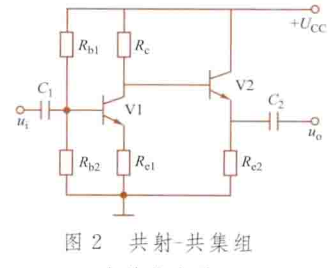


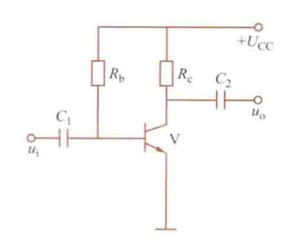
图2　共射-共集组合放大电路

gongshe fangda dianlu

共射放大电路　(common-emitter amplifier)

发射极是输入回路和输出回路公共端的放大电路。最简单的晶体管共射放大电路如图所示，其中晶体管为NPN型；R_b 称偏置电阻，用来给晶体管提供合适的偏置电流；R_c 称集电极电阻，用来提取放大了的信号电压；C_1 和 C_2 称为耦合电容，对交流信号起耦合作用，同时也有隔直流的作用。

图中，输入信号加在晶体管的基极和发射极之间，输出信号从晶体管的集电极和发射极间取出，发射极为输入回路和输出回路所共用。



共射放大电路

共射放大电路有较大的电压增益和电流增益，若忽略放大电路中的电容效应，其输出电压和输入电压的相位是反相的。共射放大电路的输入电容较大，约为

几百皮法。其输入电阻约为几百欧至几千欧，输出电阻约为几十千欧至几百千欧。

guji lilun

估计理论 （estimation theory） 阐明估计方法及估计属性的理论。动态系统的估计问题分为两类：参数估计和状态估计。它是利用含有随机误差的动态系统的观测数据去估计某些未知的参数或状态变量。

参数估计 有最小二乘估计、线性最小方差估计、最小方差估计、递推最小二乘估计、极大似然估计、贝叶斯估计等方法。

极大似然估计 设随机变量 Y 具有密度函数

$$f(y;\boldsymbol{\theta}) \overset{\text{def}}{=} f(y;\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_k)$$

式中 f 的形式已知，$\boldsymbol{\theta}=[\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_k]^{\mathrm{T}}$ 为未知参数向量。设 $Y_1,Y_2,\cdots,Y_n$ 是来自密度 $f(y;\boldsymbol{\theta})$ 的样本，则 $Y_1,Y_2,\cdots,Y_n$ 的联合密度函数为

$$\boldsymbol{L}(\boldsymbol{y};\boldsymbol{\theta})=\prod_{i=1}^{n} f(y_i;\boldsymbol{\theta})$$

对于任一样本值 $\boldsymbol{y}^*=[y_1^*,y_2^*,\cdots,y_n^*]^{\mathrm{T}}$，$L(\boldsymbol{y}^*,\boldsymbol{\theta})=\prod_{i=1}^{n} f(y_i^*;\boldsymbol{\theta})$ 只是 $\boldsymbol{\theta}$ 的函数，称为似然函数。

若有 $\hat{\boldsymbol{\theta}}=[\hat{\theta}_1,\hat{\theta}_2,\cdots,\hat{\theta}_k]^{\mathrm{T}}$ 使得

$$\boldsymbol{L}(\boldsymbol{y}^*,\hat{\boldsymbol{\theta}})=\max_{\theta\in\Omega}\boldsymbol{L}(\boldsymbol{y}^*,\boldsymbol{\theta})$$

式中 Ω 是 $\boldsymbol{\theta}$ 的可能取值范围，则称

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}=\hat{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{y}^*)=[\hat{\theta}_1(y_1^*,y_2^*,\cdots,y_n^*),\hat{\theta}_2(y_1^*,y_2^*,\cdots,y_n^*),\cdots,\hat{\theta}_k(y_1^*,y_2^*,\cdots,y_n^*)]^{\mathrm{T}}$$

为 $\boldsymbol{\theta}=[\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_n]^{\mathrm{T}}$ 的极大似然估计。

贝叶斯估计 设随机变量 Y 具有密度函数 $f(y\mid\theta)$，这里 f 的形式已知，θ 是未知参数。在极大似然估计中认为 θ 是一个不变的未知参数，在贝叶斯估计中则认为 θ 是随机变量且具有已知的先验密度 $\pi(\theta)$。一旦获得了 Y 的样本观测值 $\boldsymbol{y}^*=[y_1^*,y_2^*,\cdots,y_n^*]^{\mathrm{T}}$，则运用统计学中的贝叶斯法则可得 θ 的后验密度

$$h(\theta\mid\boldsymbol{y}^*)=h(\theta\mid y_1^*,y_2^*,\cdots,y_n^*)=\frac{\left[\prod_{i=1}^{n} f(y_1^*\mid\theta)\right]\pi(\theta)}{\int_{\Omega}\left[\prod_{i=1}^{n} f(y_1^*\mid\theta)\right]\pi(\theta)\mathrm{d}\theta}$$

式中 Ω 为 θ 的可能取值范围。

若以 α 作为参数 θ 的估计，引入损失函数，记为 $L(\theta,\alpha)$，它是 θ 和 α 的实值非负函数。作均值

$$\boldsymbol{E}\{\boldsymbol{L}(\theta,\alpha)\mid\boldsymbol{y}^*\}=\int_{\Omega}L(\theta,\alpha)h(\theta\mid y^*)\mathrm{d}\theta$$

若有 $\hat{\theta}$ 使得对于每一样本值 y^*

$$E\{L(\theta,\hat{\theta})\mid y^*\}=\min_{\alpha\in\Omega}E\{L(\theta,\alpha)\mid\boldsymbol{y}^*\}$$

则称 $\hat{\theta}=\hat{\theta}(\boldsymbol{y}^*)=\hat{\theta}(y_1^*,y_2^*,\cdots,y_n^*)$ 为 θ 的贝叶斯估计。

通常取平方损失函数 $\boldsymbol{L}(\theta,\alpha)=(\theta-\alpha)^2$ 作为损失函数，此时 θ 的贝叶斯估计就是 θ 的后验均值

$$\hat{\theta}(y^*)=E(\theta\mid y^*)=\int_{\Omega}\theta h(\theta\mid y^*)\mathrm{d}\theta$$

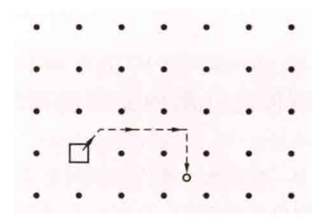
状态估计 处理状态估计的方法有维纳滤波和卡尔曼滤波，前者使用困难，后者见卡尔曼滤波。

guti dianjiezhi diandao

固体电介质电导 （electrical conduction in solid dielectrics） 固体电介质在电场作用下通过极小漏电流的性能。一般来说，固体电导的大小及导电本质与固体材料本身的组成、结构、含杂质以及外界物理条件（温度、压力、电场强度等）密切相关。固体的电导率小于 10^{-8} S/m 时，可以认为材料是处于绝缘体状态，高于 10^{-8} S/m，则处于半导体或导体状态。

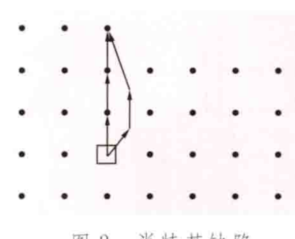
固体电介质是电气工程中应用最广、种类最多的绝缘材料。按其导电载流子的种类来区分，固体电介质的电导可分为离子电导和电子电导两种。由离子键构成的电介质及含有较多金属离子杂质的电介质如碱卤晶体、陶瓷、玻璃等多以离子电导为主。高场强下的一般固体电介质则往往以电子电导为主。

碱卤晶体（氯化钠、溴化钾等）类离子晶体的导电载流子是构成离子晶体本身的离子，故称为本征离子电导，但参与导电的仅是在热振动作用下，能离开晶体点阵进入点阵间的填隙离子和离子空穴（点阵空穴）（弗兰凯尔缺陷，见图 1）。如离子半径较大难以在点阵间稳定地运动，则离开晶格点阵的离子将迁移到晶体的表面，构成新的晶格。此时，仅有离子空穴参与导电（肖特基缺陷，见图 2）。由热力学统计力学可以求得参与导电的载流子浓度（n）均与温度成指数关系。而活化离子和空穴的迁移是以热跃迁方式进行的，即离子处于势阱中作热振动（振动频率为 ν），离子的热振动能高于势阱势垒则能发生离子热跃迁，在外加电场作用下势阱发生有方向性的变化，则可导致离子沿电场方向有较多的迁移。其平均迁移率为


图 1 弗兰凯尔缺陷

$$\mu=\frac{q\delta^2\nu}{6kT}\mathrm{e}^{-\frac{u_0}{kT}}$$

式中 u_0 为离子跃迁时所需克服的势垒；δ 为离子跃迁的距离；k 为玻尔兹曼常数；T 为热力学温度。根据 $\gamma=qn\mu$ 关系式，可以得出电导率 γ 与温度的关系式，它可以写为 $\gamma=A\mathrm{e}^{-\frac{u}{kT}}$。式中 u 为固体电介质电导的活化能。碱卤晶体的活化能 u 处于 1～2eV 范围内。


图 2 肖特基缺陷

在玻璃、陶瓷等固体电介质中虽然构成固体主体为共价键，但仍有少量 K^+、Na^+ 等金属离子与主结构构成弱束缚联系，这些弱束缚离子是此类电介质导电离子的来源，但活化能多低于 1eV。

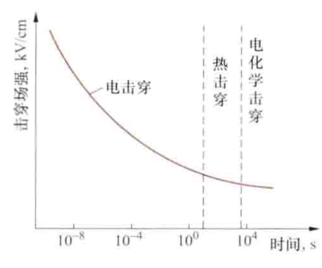
固体高分子聚合物如聚乙烯、聚丙烯、硅橡胶等在纯净的情况下有很低的电导，可以作为高压电气设备和电子元器件的绝缘材料。它们在常温下导电具有电子电导性质，而在高温下则具有杂质离子电导性质。这些材料本身体积电导很低，常常是材

料表面漏电流所引起的表面电导起着重要作用。在高场强下电极所注入的电子引起的电子电导及碰撞电离电流将占主导地位。

guti dianjiezhi jichuan

固体电介质击穿 (breakdown in solid dielectrics)

在电场作用下，固体电介质失去绝缘能力，由绝缘状态突变为良导电状态的过程。



固体电介质击穿场强与承受电压时间的关系

固体电介质的击穿与很多因素有关，温度、湿度、电场分布、散热条件、电压上升速度、电压施加时间都会影响固体电介质的击穿电压。一般说来，因电压作用时间的不同，固体电介质的击穿有三种不同形式：电击穿、热击穿和电化学击穿（见图）。对于固体电介质的电击穿过程，还有三种不同的理论解释：本征击穿、电子崩击穿、电机械应力击穿。后两种理论仅在特定条件下有一定实际意义。

guti dianjiezhi nei kongjian dianhe celiang

固体电介质内空间电荷测量 (measurement of space charge in solid dielectrics)

对固体电介质施加电场或压力，根据电介质内部空间电荷状态的微弱变化测量电介质内空间电荷的技术。空间电荷导致的电场畸变，对绝缘材料的电导、击穿破坏、老化等各方面的电特性都有明显影响。测量固体电介质内空间电荷的方法主要有电声脉冲法和压力脉冲法等。

空间电荷　宏观固体物质通常可划分为一些相同的结构单元，一般来讲，每个结构单元应该是电中性的。如果在一个或多个结构单元内正负电荷不能互相抵消，则多余的电荷称为相应位置上的空间电荷。空间电荷的存在、转移和消失会直接导致电介质内部电场分布的改变，对介质内部的局部电场起到削弱或加强的作用。

电声脉冲法（pulsed electro-acoustic method，PEA 法）基本原理如图 1 所示，在外加的上升沿和下降沿较陡的电脉冲作用下，空间电荷发生轻微位移，随之产生一个声脉冲，声脉冲被压电传感器接收产生电压信号。理想条件下，输出电压与空间电荷呈线性关系。PEA 法空间电荷测量系统的最高分辨率约为 5μm，这主要受限于电脉冲源的脉宽和聚偏二氟乙烯（polyvinylidene fluoride，PVDF）传感器的厚度。PEA 法最初仅可用于平板型（薄膜型）试品的空间电荷测量，通过改进已可直接应用于同轴型试品如电力电缆。为满足不同的需要，发展了基于 PEA 法的各种空间电荷测量系统。如：可以测量空间电荷三维剖面的附加声透镜的三维 PEA 系统，可以观测瞬时空间电荷状态的瞬时 PEA 系统，可以应用在特殊温度环境中的极高-低温度 PEA 系统，可用于现场监测的便携式 PEA 系统等。

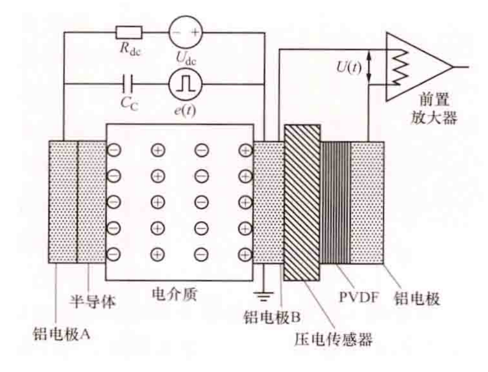


图 1　PEA 法空间电荷测量基本原理示意图

R_{dc}—直流电阻；U_{dc}—高压直流电源；C_C—耦合电容；$e(t)$—高压脉冲信号；$U(t)$—PEA 输出电压信号

压力脉冲法　基本原理如图 2 所示。在试样一侧施以均匀的压力，压力波以声速在试样中传播，试样中出现压缩现象，导致极化产生。由于极化，试样两端的电极上出现电荷的变化，这种变化取决于空间电荷分布以及压力脉冲的幅值等。外电路的开路或短路，将会直接影响到空间电荷对两极产生电压或者电流的大小。

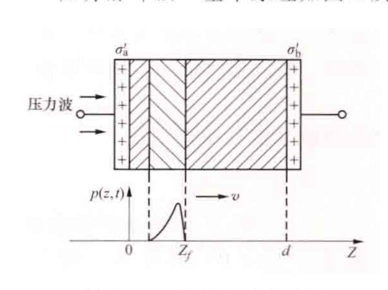


图 2　压力脉冲法的基本原理示意图

σ'_a、σ'_b—面电荷；Z—电介质厚度方向；v—声压波传播速度；$p(z, t)$—声压波的幅值

基于压力脉冲原理已发展出激光感应压力脉冲法和压电压力波法。

（1）激光感应压力脉冲法（laser induced pressure pulse method，LIPP 法）基本原理如图 3 所示。将一束脉冲激光冲击在与试样紧密接触的靶上，产生一个前沿非常陡峭（相对于对应时间内声波传播的距离与试样厚度而言）的压力波，激光的能量使靶部分汽化而产生向后喷射的蒸汽。按照能量守恒定理，会有一个压缩脉冲以声速穿过靶与试样。当压力波传播过试样时，测量试样两端的电压或电流，则可以求解空间电荷的分布关系。

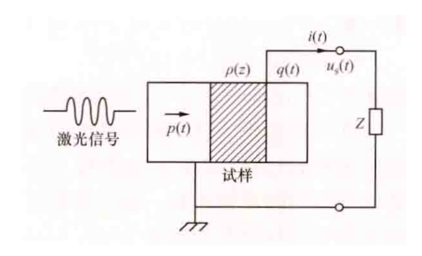


图 3　激光感应压力脉冲法基本原理示意图

$p(t)$—声压波幅值；$\rho(z)$—空间电荷密度；$q(t)$—传感器感应电荷；$i(t)$—输出电流信号；$u_s(t)$—输出电压信号；Z—采样电阻

（2）压电压力波法（piezo-electric induced pressure wave propagation method，PIPWP 法）　基本原理如图 4 所示。与 LIPP 法的区别在于 PIPWP 法使用电脉冲来产生压力波脉冲，它在介质中传播，引起介质中电荷发生微小位移，导致介质电极上

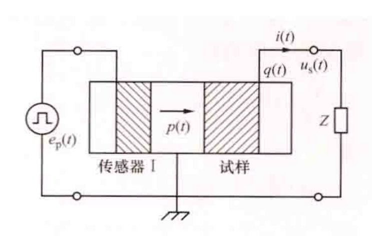


图 4　压电压力波法基本原理示意图

$e_p(t)$—高压脉冲；$p(t)$—声压波；$q(t)$—传感器感应电荷；$i(t)$—输出电流信号；$u_s(t)$—输出电压信号；Z—采样电阻

感应电荷量变化，从而在外电路上观测到电流及电压信号的变化，获得介质中空间电荷的分布信息。

guanlian juzhen

关联矩阵

（incidence matrix） 见网络图论。

guanxi shujuku

关系数据库

（relational database） 采用关系原理和方法，以关系数据模型为基础建立的数据库。一般是指由关系数据库管理系统产生的关系数据库。关系数据模型是由若干个关系框架组成的集合。每个关系框架相当于一个记录类型，记录类型的值称为关系框架的元组（tuple）。关系框架的多个元组组成的二维表称为关系，因此也相当于同质文件。若干个关系构成一个关系数据库。

用关系数据模型表达实体模型时，记录类型及其联系均用关系描述。例如可把学生号、课程号作为数据项放入到关系“学习”中，使记录类型“学生”和“课程”发生关系，表示了它们之间的联系。关系有严格的数学上的定义：给定值域 $D1$，$D2$，…，Dn，其笛卡尔乘积：$D1 \times D2 \times \cdots \times Dn$ 集合的子集称为一个关系。当然子集是根据某关系要表达的实际意义来选取的。在关系数据库中，对数据库的定义是：描述各个关系名，每个关系框架由哪些数据项（称为属性）组成，以及关系的关键字等。对关系数据库的操作基于关系代数的运算，如用关系（看作集合）并、交、差、乘积、选择、投影、连接等运算表达数据库的增加、删除、修改操作。

在关系数据库系统中，研究关系模型中数据相互依赖和规范化关系的理论称为关系数据理论。由于关系模型可以等价地转换为其他数据模型，因此关系数据理论的研究具有指导数据库逻辑设计的普遍意义。数据的相互依赖称为相关性，如说数据 A 可以决定数据 B，则数据 B 依赖于数据 A。按照关系中各属性相互依赖的不同程度，概念上把关系分成不同级别的规范，满足某种程度的关系称为某一范式（normal form，NF），如第一范式（1NF）、第二范式（2NF）、第三范式（3NF）、BC 范式（boyce-codd NF）、第四范式（4NF）和第五范式（5NF）等。把低一级范式关系，不损失信息量地转换为高一级范式的过程称为规范化过程。

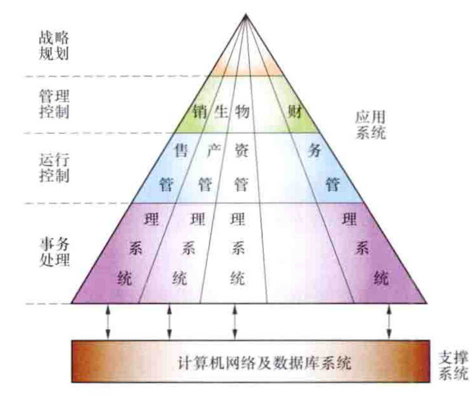
guanli xinxi xitong

管理信息系统

（management information system，MIS） 一个以人为主导，利用计算机硬件、软件、网络通信设备及其他办公设备，进行信息的收集、传输、加工、储存、更新和维护，以组织战略竞优、提高效益和效率为目的，支持组织的高层决策、中层控制、基层运作的集成化的人机系统。

基本功能　管理信息系统的功能主要有数据处理、预测、计划、控制和辅助决策。①数据处理：包括数据收集和输入，数据传输、存储、加工处理和输出。它准备和提供统一格式的信息，使各种统计工作简化，信息成本最低。②预测：运用现代数学方法、统计方法或模拟方法，根据过去的数据预测未来的情况。③计划：根据企业提供的约束条件合理安排各职能部门的计划，按不同的管理层提供相应的计划报告。④控制：根据各职能部门提供的数据，对计划的执行情况监测、检查，比较执行与计划的差异，分析产生差异的原因，辅助管理人员及时以各种方法加以控制。⑤辅助决策：采用各种数学模型和所存储在计算机中的大量数据，及时推导出有关问题的最优解或满意解，辅助各级管理人员进行决策，以期合理利用人、财、物和信息资源，取得较大的经济效益。

结构　管理信息系统的结构如图所示，主要包括支撑系统和应用系统。支撑系统由计算机、计算机网络和数据库系统等组成，为应用系统提供运行环境。支撑系统有两种典型的结构形式：集中式结构和分布式结构。一个管理信息系统中的各子系统之间借助通信网络与数据库实现互连及数据共享，使整个系统集成为一个有机整体。管理活动一般分为运行控制层、管理控制层及战略规划层三个层次，MIS 的各子系统都有相应功能支持这些层次上的管理活动，每个子系统还有一个事务处理功能，支持最底层日常例行的事务数据处理，这一层功能涉及的数据量最大，且处理过程是预先确定的，结构化、程序化程度最高。越往上，加工处理数据越综合，数据量越少，结构化、程序化程度越低。一般的管理信息系统对战略规划层的活动支持较弱，这部分功能将由专门的决策支持系统提供。



管理信息系统结构

开发　管理信息系统的开发主要是应用软件的开发，根据管理目标、内容、规模和性质，从系统观点出发，运用系统工程方法，设计和实现管理信息系统。（见软件工程）

运行管理　系统运行是管理信息系统的目的所在，系统运行中的制度管理、文档管理、安全与保密管理是保障系统应用和提高效率与效益的重要环节。运行管理是对 MIS 的运行进行控制，记录其运行状态，进行必要的修改与补充，以便使管理信息系统真正符合管理决策的需要，为管理决策服务。

应用　主要有国家经济信息系统、企业管理信息系统、事务型管理信息系统、办公型管理信息系统和专业型管理信息系统等。信息技术与管理思想的发展、经营环境与经营理念的变化成为管理信息系统应用得以不断深入发展的动力。

guangdao cailiao

光导材料

（photoconductive materials） 能传输光频电磁波能量和信号的光传输介质材料。相对于导体和半导体材料，纯净的电介质材料具有较高的透光特性，如空气、水、玻璃等。

没有一种材料对所有波长的光都是透明的，有些材料对某些波长的光是透明，而对其他波长的光有吸收。材料的电子能带结构决定其光吸收特性，当注入材料的光子能量大于电子禁带宽度时，能引起电子能带跃迁吸收，降低材料的透明性。

光导纤维是光导材料最成功的应用例子，它由石英玻璃或

有机玻璃材料制成，利用光波全反射原理实现光的定向传播。石英光纤以二氧化硅为主要原料制成，通过调节掺杂量来控制纤芯和包层的折射率分布，具有宽带、低损耗的特点，已广泛用于有线电视和通信系统。塑料光纤是由高透明的聚合物（聚苯乙烯、聚碳酸酯、聚甲基丙烯酸甲酯、氘化和氟化聚合物等）制成，已广泛用于显示照明、短距离通信和汽车电子系统。光子晶体光纤是一种微结构控制光纤，在石英或塑料光纤横截面形成二维周期性结构，在纤芯中心设计出一个缺陷，利用光子禁带效应使光波沿着光纤中心缺陷传输，已在高灵敏性光谱、非线性光学和传感、超宽色散补偿等方面得到应用。

guangdian bandaoti qijian

光电半导体器件 (photo semiconductor device) 利用半导体材料的光电效应制成的固态电子器件。光电半导体器件经过一个多世纪的发展，现已广泛用于国防建设、工业自动控制与检测、宇宙空间技术和家用电器等国民经济各个领域。

光电半导体器件正在向小型化及片状化发展。目标是提高其灵敏度，增宽光谱范围，使其具有选择性的光谱特性，降低暗电流和提高响应速度，逐步向多功能、集成化和智能化方向发展。

光电半导体器件可分为发光器件与光敏器件两大类。

发光器件 将电能转换成光能的器件，常见的有发光二极管（LED）。

光敏器件 将光能转换成电能的器件，常见的有光电二极管和光电三极管等。光敏器件按结构又可分为两类：①无结器件：为均质型，是依据半导体的光电导效应制成的器件，如光敏电阻。②结型器件：可分为PN结型、PIN型和肖特基势垒型等，是依据光生伏特效应工作的器件，如光电二极管和多极管、光电池等。

光敏电阻 又称光导管。其工作原理是：无阻挡层的半导体材料受光照射而产生空穴和电子，这些载流子有效地参与导电使材料的电阻率发生改变，光照越强电阻越小。常见的CdS和CdSe光敏电阻是应用在可见光谱范围内，而PbS、InSb和ZnS则分别对红外光和紫外光敏感。光敏电阻的图形符号如图1所示。因它无极性，故在交直流电路中均可使用。国际上的产品已系列化，额定功率从25mW到1W分15个等级，最大工作电压可由70V到460V，暗阻与亮阻之比从15倍到250 000倍。光敏电阻可用于电视机亮度的自动调节、路灯的自动点亮和熄灭、照相机的电子快门等电路中。

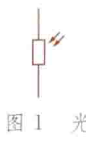


图1 光敏电阻图形符号

光电耦合器件 将发光器件和光敏器件组合而成。用它可执行电-光-电信号的转换。应用最广的是发光二极管、光电三极管型光电耦合器。其图形符号如图2所示。它的特点是：输入输出之间电气绝缘，抗干扰能力强，频带宽，体积小，寿命长，无触点，能传输模拟或数字信号等，已广泛应用于控制、检测和报警等各种装置中。

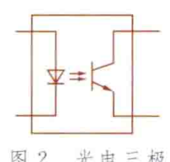


图2 光电三极管型光电耦合器图形符号

光电池 利用光生伏特效应将光能变成电能的器件。它与光电二极管在结构上仅是结面积大小不同，但其PN结是工作于零偏置状态下。此时，PN结受光照后产生正向电压作光致发电器件。硅光电池按衬底材料不同可分为2DR型和2CR型。图3为光电池的符号。按用途可分两大类：①将太阳能转换成电能的器件，主要用作人造卫星和宇宙飞船等的电源，称太阳能电池；②将光信号转换为电信号的器件，如用于照相机电子快门的自动测光器，称测量光电池。



图3 光电池符号

guangdian celiang xitong

光电测量系统 (photo-electrical measuring system) 利用电光效应、磁光效应或光通信技术进行测量的系统。在高电压领域内，可对处于高电压、大电流环境下的各种物理量进行测试和传输。如电压电流幅值、相位、电场强度等。在光电测量系统中，利用光纤传输线路良好的绝缘性能，把高压设备或试品与高灵敏度的测量仪器及计算机隔离开来，除了可以提高测量仪器及工作人员的安全性外，还可减弱射频干扰和杂散寄生信号对测量回路的影响。

光电测量系统常有下列几种调制方式：①幅度-光强度调制方式（AM-IM方式）；②频率-光强度调制方式（FM-IM方式）；③数字脉冲调制方式；④利用电光效应的外调制方式。

AM-IM方式 20世纪70年代初，日本已研制成一种光电式分压器。它的电光变换器是采用发光二极管LED直接把电信号转换为光信号的方式。在图1中示明了它的工作原理。在额定电压为800kV、阻值为8.11kΩ以及额定电压为2000kV、阻值为15.5kΩ的冲击电阻分压器的高压顶端，分别装设了屏蔽球。球内有一发光二极管LED与分压电阻相串联。由发光二极管发出的光强度与流过它的电流大小成正比。光信号通过数米长的光导纤维引到大地侧，然后通过光电转换将光信号还原成电信号输入示波器。图中的R_2（30Ω）及C_2（1600pF）是用来调节阶跃响应特性用的。电信号取自分压器高压端，可获得较好的响应特性。发光二极管在额定电流以下的线性度很好，在暂态特性方面能满足要求，上升时间为几个纳秒。发光二极管存在温度稳定性的问题，可以在试验前后进行校正。

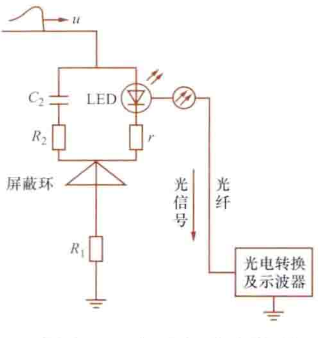


图1 日本光电式分压器

FM-IM方式 这种调制方式是利用压控振荡器的输出频率随调制信号的大小发生线性变化的原理来传递信息的。它的测量系统如图2所示。图3为冲击电压发生器G顶部所安装的光发送部分的示意图。图中，S为冲击电压发生器顶部的球形屏蔽电极。C_S和C_m构成了电容分压器的两个臂。C_m上获得的信号电压u_m经FM-IM方式调制后形成光信号，通过光缆传输到近地面处，再经过解调后输出电信号。频率

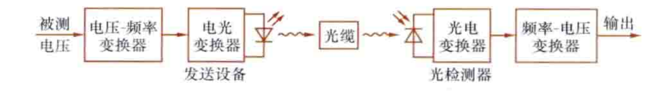


图2 FM-IM方式组成的测量系统

调制比幅度调制，具有更高的抗干扰能力。它可以克服光源非线性和温度变化造成的不利影响。

数字脉冲调制方式　数字脉冲调制是用脉冲电码的一种调制方式。通过电码传送模拟信号各个采样的量化值。例如可以把图3中C_m上的电压u_m送到高采样率和高分辨率的模数转换器中去，由它完成采样和量化过程。输出的数字信号再经过编码器，变换成二进制脉冲电码，经接口输入到光纤数字通信系统中。经过另一个编码器等环节，把电设备中的脉冲电码码型变换成适合于光纤数字通信的码型。把重新编码的数字信号经驱动电路放大后，驱动光源。光源将电信号变换为光信号后送入光纤。经光纤把光信号送到光电变换器，经过译码器、数模转换器输出模拟电压信号，供示波器进行测量。

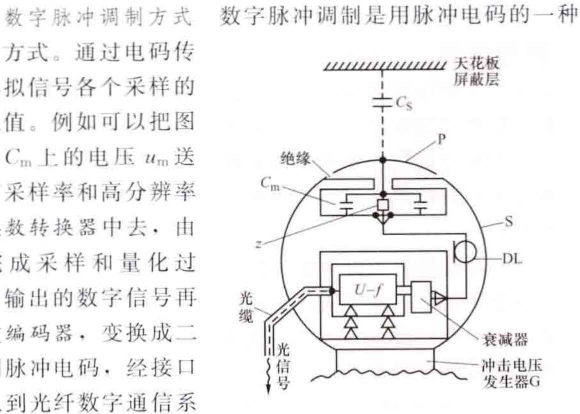


图3　冲击电压发生器测电压用分压器及光的发送部分示意图
P—工作电极；C_S—P与天花板间的耦合电容；C_m—低压臂电容；z—同轴电缆匹配电阻；DL—同轴电缆；U-f—电压-频率变换器及光发送器；S—与发生器G顶部相连的金属球体

利用电光效应的外调制方式　应用得较多的一种电光效应是泡克尔（pockels）效应。

有一些晶体物质如铌酸锂（$LiNbO_3$）、硅酸铋（Bi_2SiO_2）及水晶等具有泡克尔效应。当对这些晶体（见图4）的y方向施加电场的条件下，在它z方向的另一个端面射进圆偏振光时，在元件内互相垂直的偏振光方向上发生了折射率差，其结果使偏振光之间的相位差发生变化，由于干涉，输出的光强与施加电压呈一定函数关系。根据电光效应的原理，可制成电光调制器，用它来测量电场强度或电压。

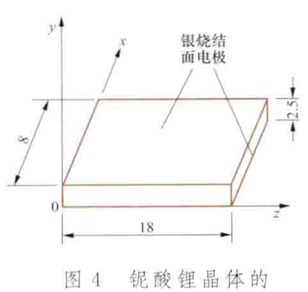


图4　铌酸锂晶体的结构和尺寸

一种快速脉冲电压测量装置的结构框图如图5所示。它包括激光光源、电光调制器、光纤、光电接收器PIN以及放大器、示波器等。其中电光调制器相当于传感头，它又包括起偏器、用铌酸锂制成的电光晶体、1/4波片、检偏器、自聚焦透镜等。1/4波片（0.85μm波长）的作用是调整工作点的位置，使之移到线性区域。此装置的实验阶跃响应特性很好，上升时间为几个纳秒。

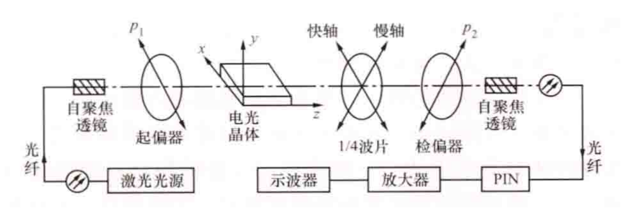


图5　用电光调制器组成的测压装置

guangdian erjiguan

光电二极管

（photodiode，PD）　在两个半导体之间的PN结附近或半导体与金属之间的接触面附近吸收光辐射，且能将光信号转变为电信号的光电半导体器件，也称为光敏二极管。它是结型器件，用硅或锗作材料采用平面型结构制成。光谱范围：硅光电二极管为0.6～1μm；锗光电二极管为0.5～1.7μm。用作光电导器件时其PN结须反向偏置，光照激发所产生的载流子形成反向电流。其输出电流为微安级，与光照强度成正比，灵敏度典型值是0.1μA/Lx。图1是其特性曲线，图形符号如图2所示。光电二极管常用于光信息的检测和激光信号的解调。

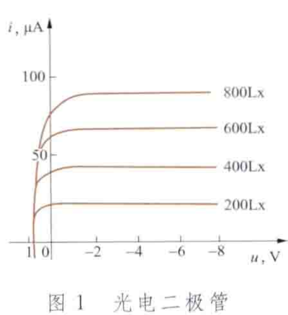


图1　光电二极管特性曲线

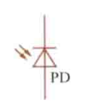


图2　光电二极管图形符号

光电二极管分为PN结型、PIN型、雪崩型等。

PN结型（PD）　图3为其结构示意图。当PN结受到能量大于禁带宽度的光照时，价带中的电子吸收光能后跃迁到导带成为自由电子，同时在价带中留下空穴，这些电子和空穴即为光生载流子。在结电场作用下，耗尽区的光生载流子分别向P区和N区扩散，使P区过剩空穴、N区多电子，建立起P正N负的电场，阻止载流子的继续扩散。当受光照的光电二极管加反向电压后，在内外两电场共同作用下，光生载流子参与导电，从而形成了反向的电流。它随入射光的强度变化而改变，使光信号变成电流信号，响应时间为10^{-7}s。不受光照时PN结反向漏电流为暗电流。

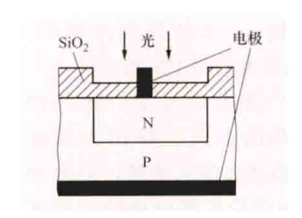


图3　光电二极管的结构

根据衬底材料的不同光电二极管分为2DU和2CU两种型号。2DU是以P型硅为衬底，设有一个环极，使用时其电位始终保持高于光电二极管的负极电位见图4，以减少暗电流和噪声。2CU是以N型硅为衬底，不需设置环极，只有两个引出线。一般光电二极管都有很好的线性特性，典型的光信号放大电路如图5所示。

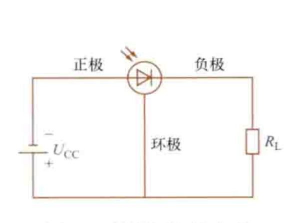


图4　2DU型管电路

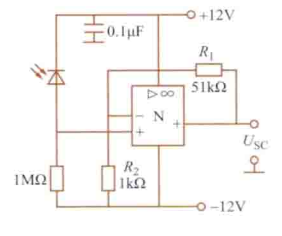


图5　光信号放大电路

PIN型（PIN-PD）　为适当选择耗尽层厚度，在P^+型层和N^+型层中间加入一层本征型的I型层，可获得较高的灵敏度和较好的频率响应，适用于快速反应场合。

雪崩型（APD）　利用在高反向偏压下发生雪崩倍增效

应而制成的光电器件。其光电流增益可达10^2～10^4，灵敏度高，具有光电倍增效应，响应快，可工作到10^5MHz，适用于探测弱光信号。

此外，还出现了肖特基结型光电二极管。

一般而言，在工作频率低于10MHz的电路中应选用PN型，高于10MHz则应选用PIN型或雪崩型。

guangdian huganqi

光电互感器 (photoelectric measuring transformer)

见电子式互感器。

guangdian sanjiguan

光电三极管 (phototransistor) 将光能转换成电能且具有电流放大作用的光电半导体器件，也称为光敏三极管。已广泛用于工农业生产、交通监控、灾害报警和医疗监护等各个领域。用锗或硅单晶制造的两个PN结能组成PNP型或NPN型的光电三极管。NPN型平面硅光电三极管（3DU型）的结构示意和图形符号见图1。PNP型光电三极管的型号为3CU型。

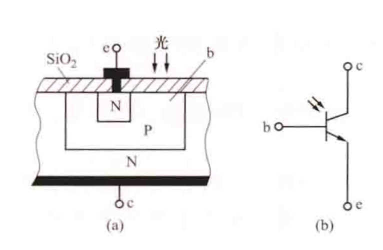


图1 光电三极管示意图
(a) 结构示意图；(b) 图形符号

工作原理 光电三极管的结构相当于一个光电二极管与普通晶体三极管的组合件，其等效原理图如图2所示。当电源电压U_{CC}的正极通过R_L接到集电极c，电源负极接到发射极e，基极悬空浮置时，cb极间的PN结相当于一个光电二极管，光照产生的电流正好作为基极电流i_B流入基极，经放大β倍后在集电极输出随光照强度变化的集电极电流i_C。

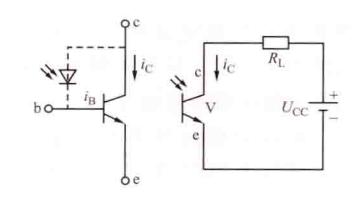


图2 光电三极管的等效电路

光电三极管的伏安特性与普通晶体管的输出特性曲线相仿，只是用光照代替了基极电流，见图3。通常产品只有集电极和发射极有引出线。基极有引出线的光电三极管比基极没有引出线的管子更易受外界噪声的干扰。基极装上引出线的目的是为了能更好地工作在管子的线性区和改善弱光输入时的响应时间。

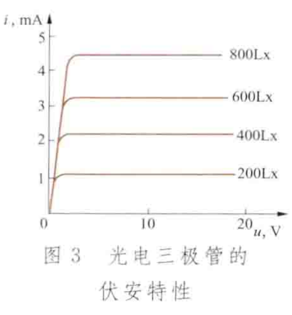


图3 光电三极管的伏安特性

技术性能 典型产品的最高工作电压有10、30V和50V等档次；暗电流小于0.3μA；在1000Lx光照时的集电极电流达几毫安到几十毫安；响应时间5～10μs；工作频率低于200～300kHz；光谱响应范围为0.4～1.1μm。光电三极管选用砷化镓(GaAs)红外发光二极管当作白炽灯作光源或用太阳光作光源，不宜用荧光灯。

guangpan cunchuqi

光盘存储器 (optical disk storage) 采用激光在盘式介质上进行高密度记录的信息存储装置。光盘所存储的信息有模拟式和数字式两种。用微米级聚焦激光束在媒体表面上形成相应的物理变化来表示数据的记录；读出时，用聚焦激光束照射媒体表面，检测相应记录位所产生的光学性能上的差异。

光盘存储器的主要性能参数有存储容量、道密度、位密度、数据传输率、盘转速、平均存储时间等。它具有记录密度高（约为600KB/mm^2）、存取速度快、寿命长、光盘头与光盘间非接触读写等优点。

自1972年菲利浦公司发行光学式电视唱片以来，光盘发展异常迅速。它有只读型、一次写入型和可抹型三种。

（1）只读型光盘。由厂家预先用激光在盘片上蚀刻不能再改写的视频、音频数字信息而成。激光电视唱片、数码唱片以及计算机用的小型只读型光盘均属此类。

（2）一次写入型光盘。由用户写入，可多次读出，但不能擦除。要修改的数据只能追记在盘片上的空白区内，故又称为追记型光盘。它适用于不要修改的大型数据库系统。

（3）可抹型光盘。主要包括磁光型、相变型和有机染料/聚合物型等。①磁光型。利用激光照射在磁性薄膜上产生的热磁效应来记录信息的方式。磁光型在研制、生产和应用等方面均居领先地位。②相变型。利用激光照射在TeO（氧化碲）、Ge（锗）、Sb（锑）、Te（碲）等记录媒体上产生的相变效应来记录信息的方式。应用最多的是晶态—非晶态相变效应。③有机染料/聚合物型。利用激光照射在有机染料/聚合物媒体上形成凹凸坑来记录信息的方式。

按照功能特征，可抹型光盘从改写型光盘驱动器向重写型光盘驱动器发展。①改写型。在写入信息之前，需要先抹后写。其媒体可换，可用其取代磁带和软盘作为硬盘驱动器后援存储器，广泛应用于高档微机、工作站及超级小型机中。②重写型。具有磁盘那样的“同时消录”功能，即在擦除旧信息的同时记录新信息。其驱动器速度高，容量大。

guangxian shiboqi

光线示波器 (light beam oscilloscope) 利用振子偏转将光点反射到感光纸上，以记录一个或多个电参量，如电流、电压、功率等瞬时变化的记录仪器，又称机械示波器。

现在极少使用，已基本被具有存储和记忆功能的数字储存示波器所取代。

guifanxing

规范型 (canonical form) 状态空间表达式的几种特殊的简单形式，又称标准型。

一个控制系统的输入、输出变量确定，内部结构可以有无穷多种。因此状态空间表达式也可以有无穷多种形式。有几种特殊的简单形式——规范型，为分析和设计提供了方便。一个控制系统简化成各种规范型后：①可控性、可观测性保持不变；②特征值保持不变；③输入-输出传递函数矩

阵保持不变。

线性定常控制系统的状态空间表达式是

$$\left.\begin{aligned}\dot{x}&=Ax+Bu\\y&=Cx+Du\\x&\in R^n,\ y\in R^q,\ u\in R^p\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

式中 x 为 n 维状态向量；u 为 p 维输入向量；y 为 q 维输出向量。

由某个 $n\times n$ 维正则矩阵 T 进行坐标变换，令 $x=T\tilde{x}$，$\det T\neq 0$，$\det T\neq 0$，就可以得到代数等价的另一个系统，或者说得到这个控制系统的另一种状态空间表达式

$$\left.\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}&=A\tilde{x}+\tilde{B}u\\y&=\tilde{C}\ \tilde{x}+\tilde{D}u\end{aligned}\right\}\qquad(2)$$

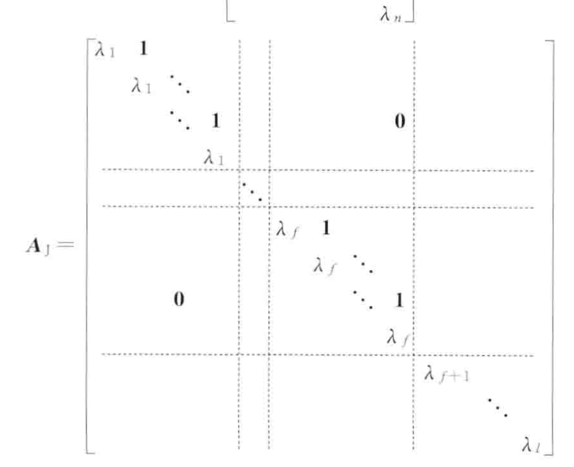
选择恰当的变换矩阵 T 就可以获得最简单的状态空间表达式。由于不能同时使矩阵 A、B、C 和 D 都变成最简单形式，通常单输入可控系统矩阵对（A，B）可变换成下述规范型（A_i，B_i）$i=1$，2，3，式中 I 为幺阵，a_1，a_2，…，a_n 为特征方程式 $s^n+a_1s^{n-1}+\cdots+a_{n-1}s+a_n=0$ 的系数，它们称为可控规范型。单输出可观测系统矩阵对（A，C）可变换成（A_i^{T},B_i^{T}），$i=1$，2，3，它们称为可观测规范型。

$$A_1=\begin{bmatrix}0 & -a_n\\ & -a_{n-1}\\ I_{n-1} & \cdots\\ & -a_1\end{bmatrix}\quad B_1=\begin{bmatrix}1\\0\\\cdots\\0\end{bmatrix}$$

$$A_2=\begin{bmatrix}-a_1 & \\ \cdots & I_{n-1}\\ -a_{n-1} & \\ -a_n & \mathbf{0}\end{bmatrix}\quad B_2=\begin{bmatrix}0\\\cdots\\0\\1\end{bmatrix}$$

$$A_3=\begin{bmatrix}0 & I_{n-1} & & \\ -a_n & -a_{n-1} & \cdots & -a_1\end{bmatrix}\quad B_3=\begin{bmatrix}0\\\cdots\\0\\1\end{bmatrix}$$

$$A_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix}\lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n\end{bmatrix}$$



当 A 的特征根 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_n$ 互异时，可将 A 变换成对角型 A_{d}。当特征方程有互异的单根 $\lambda_{f+1},\lambda_{f+2},\cdots,\lambda_l$ 和重根 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_f$，且每个重根只对应于一个"约当块"时，可将 A 变换成约当型 A_{J}。A_{J} 主对角线上末一子块对应于单根，呈对角型。A_{J} 主对角线上其余子块为约当块，约当块主对角线上元素为对应的特征根；紧邻主对角线上方的一根斜线上元素为 1，其余元素为 0。A_{J} 主对角线子块以外的其余子块，全部元素为 0。

guiwenya erjiguan

硅稳压二极管 （silicon voltage stabilizing diode）

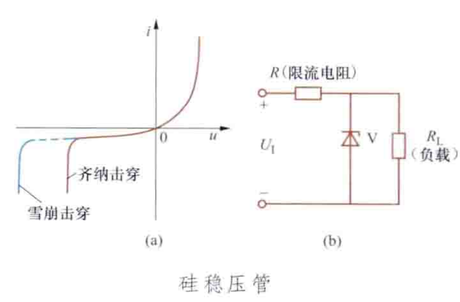
在规定电流范围内，电极间可产生基本上恒定电压的硅半导体二极管。在 PN 结反向偏置时，在某个特定的反向电压值下电流大大增加，这种现象称为击穿。引起击穿的机制有齐纳效应和雪崩效应两类。

在薄的高掺杂的 PN 结二极管中，耗尽区很窄，在耗尽区内容易形成一个很强的电场。当反向电压加到某一定值时，这个电场将电子从晶格结构中拉出来，致使共价键受到破坏，从而产生大量的电子-空穴对，形成大电流。通常在 5V 及以下便出现这种现象，称为齐纳效应，又称齐纳击穿。稳压值在 5V 以下稳压管的击穿属于齐纳击穿。

加上大电压时，在普通的 PN 结中，电子也可以加速到高能量而从晶格中撞出其他电子，这些电子-空穴对又继续发生碰撞产生更多的电子-空穴对。这种载流子倍增过程称为雪崩效应，一般稳压值在 6V 以上稳压管的击穿属于雪崩击穿。

当外加约 5V 的电压即产生击穿时，两种效应同时存在。这种稳压二极管具有很低的温度系数，所以对温度变化颇不灵敏。

硅稳压二极管通常工作于反向击穿状态，用于稳定直流电压，其伏安特性如图(a)所示，典型应用电路如图(b)所示，图中与稳压二极管 V 串联的电阻 R 用于限制流过稳压管中的电流，故常称为限流电阻。



硅稳压管

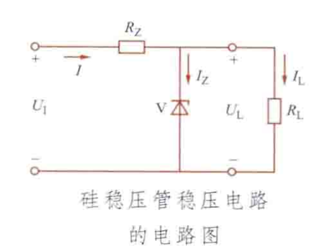
(a) 伏安特性曲线；(b) 简单稳压电路

guiwenyaguan wenya dianlu

硅稳压管稳压电路 （zener voltage stabilizing circuit）

将硅稳压二极管和负载并联使负载两端电压近于恒定的稳压电路。

由限流电阻 R_Z 和稳压管 V 串联组成的硅稳压管稳压电路如图所示。电路中起稳压作用的稳压管与负载 R_L 并联，故又称并联式稳压电路。为了保证稳压电路能正常工作，限流电阻 R_Z 的选取应在输入电压为最小值 U_{Imin}、负载电流 I_L 为最大值 I_{Lmax} 时，能保证流过稳压管的电流 I_Z 不小于最小的稳定电流 I_{Zmin}；而在输入电压为最大值 U_{Imax}、负载电流为最小值 I_{Lmin} 时，又



硅稳压管稳压电路的电路图

能保证流过稳压管的电流 I_Z 不大于规定的最大值 I_{Zmax}。即

$$\frac{U_{Imax}-U_L}{I_{Zmax}+I_{Lmin}}<R_Z<\frac{U_{Imin}-U_L}{I_{Zmin}+I_{Lmax}}$$

在满足上式条件下，R_Z 值选得越大，电路的电压调整率 $S_u=\partial U_L/\partial U_I\approx r_Z/R_Z$（$r_Z$ 为稳压管的动态电阻）就越小。该电路的输出电阻 $r_o=\partial U_L/\partial I_L\approx r_Z$。

硅稳压管稳压电路结构简单，调试方便，但输出电压不能调节，输出电流受稳压管最大稳定电流的限制，故这种稳压电路通常只应用在输出电压不需调节，输出电流不大，且负载变动也不大的场合。

guodianya

过电压

过电压（overvoltage） 超过电力系统最高工作电压（与不同额定电压等级对应）的电压。需要研究电力系统不同类型过电压的产生机理、分析及计算方法和防护技术。过电压是一个相对概念，研究范围低至数十伏的低压系统到220V电源系统，高到1000kV的交流特高压系统和±1100kV的直流特高压系统。

按机理分类 按产生的机理或起因，过电压可以分为外部过电压和内部过电压两大类。电力系统呈现的内部、外部过电压幅值和持续时间是随机性的，具有一定的统计规律。

外部过电压 由电力系统外部雷电引起的过电压，称为外部过电压，或称大气过电压，也称雷电过电压。（参见大气过电压）

内部过电压 由电力系统内部故障或开关操作引起系统的参数发生变化，导致电力系统内部电磁能量转换或传递而产生的过电压，称为电力系统内部过电压。

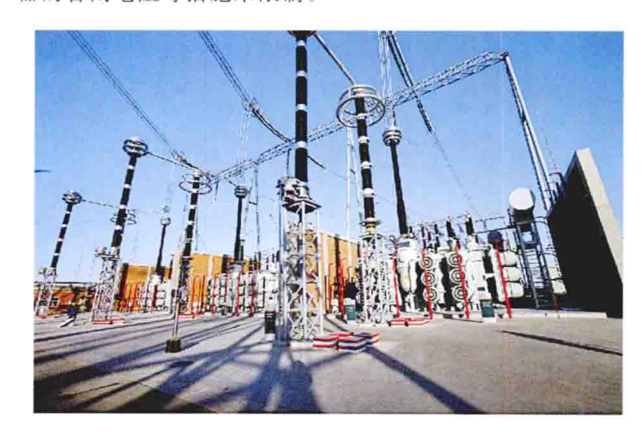
系统参数变化的原因是多种多样的，因此内部过电压的幅值、振荡频率、持续时间不尽相同。内部过电压分为操作过电压和暂时过电压两大类。操作过电压是在故障或操作时瞬间发生的电磁过渡过程中的过电压，一般持续时间在0.1s以内。暂时过电压包括谐振过电压和工频电压升高，持续时间大于0.1s乃至更长，产生的原因主要是空载长线路的电容效应、不对称接地故障、负荷突变以及系统中可能发生的线性或非线性谐振等。

按波形分类 分为低频过电压和瞬态过电压两大类。

低频过电压 分成两种：持续长时间过电压（频率为50Hz或60Hz）和暂时过电压。暂时过电压持续时间可达数秒以至数分钟以上，衰减缓慢，频率在10～500Hz之间。

瞬态过电压 又分缓波前、快波前和陡波前三种。①缓波前过电压，波头长度一般在20～5000μs，波尾长度一般小于20ms，例如在故障或操作瞬间所发生的过渡过程过电压，由于是操作引起的，又称电力系统操作过电压，因波头较长，有时也称长波前冲击波。②快波前过电压，波头长度一般在0.1～20μs，波尾长度一般小于300μs，例如雷电过电压或切除空载变压器引起的过电压。③陡波前过电压也称电力系统特快速瞬态过电压，波头较短，一般在3～100ns，产生于气体绝缘变电站（GIS）的开关操作。瞬态过电压按波前划分的目的，是在实验室产生相应的冲击电压波，以进行设备绝缘和保护装置的各种特性试验。

过电压防护 外部过电压防护是一项系统过程，主要措施包括：采用避雷针和避雷线分流雷电流，采用避雷器（见图）来限制雷电作用时的过电压，采用接地装置将雷电流流散到地中。暂时过电压的工频电压升主要通过安装并联电抗器和静止补偿装置、采用良导体地线、快速磁通灭磁保护、电压速断保护等来防护，而谐振过电压主要通过消弧线圈来限制。操作过电压主要通过安装并联电抗器、避雷器和断路器的合闸电阻等措施来限制。



交流特高压变压器、避雷器和电压互感器



H∞ kongzhi

H∞控制 (H∞ control) 基于H∞控制理论和方法的新型控制。1981年，加拿大学者G.扎美斯（G. Zames）首先在控制器设计中考虑数学模型和实际对象之间的误差，提出用系统传递函数矩阵的H∞范数来表述控制系统的优化指标。经过不少学者的共同努力，1987年H∞控制理论体系已初步形成，第一部专著B.A.法兰西斯（B. A. Francis）的《H∞控制理论课程》问世。H∞控制可以用于状态反馈、输出反馈、灵敏度极小化、鲁棒镇定（相加型摄动，相乘型摄动）、跟踪、滤波、自由度等。

设传递函数矩阵$\boldsymbol{\Phi}(s)$为s右半平面上解析的有理函数阵，定义其H∞范数为

$$\|\boldsymbol{\Phi}(s)\|_{\infty}=\sup_{\omega}\sigma_{\max}[\boldsymbol{\Phi}(\mathrm{j}\omega)] \tag{1}$$

式中$\sigma_{\max}$为最大奇异值。设$\boldsymbol{\Phi}\in C^{n\times m}$，方阵$\boldsymbol{\Phi}^{*}\boldsymbol{\Phi}$和$\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Phi}^{*}$均为非负定方阵，$\boldsymbol{\Phi}^{*}$为$\boldsymbol{\Phi}$的共轭转置，$\mathrm{rank}\boldsymbol{\Phi}^{*}\boldsymbol{\Phi}=\mathrm{rank}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Phi}^{*}=\mathrm{rank}\boldsymbol{\Phi}=r$，$\boldsymbol{\Phi}^{*}\boldsymbol{\Phi}$和$\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Phi}^{*}$有$r$个正特征值$\lambda_i(\boldsymbol{\Phi}^{*}\boldsymbol{\Phi})=\lambda_i(\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Phi}^{*})>0$，$i=1,2,\cdots,r$。则称$\sqrt{\lambda_i}$为$\boldsymbol{\Phi}$的非零奇异值，记$\sigma_i=\sqrt{\lambda_i}$，$\sigma_{\max}$为最大奇异值。

考虑如图1所示系统，其中$\boldsymbol{u}$为p维控制输入向量，$\boldsymbol{y}$为q维观测向量，$\boldsymbol{w}$为r维干扰向量，$\boldsymbol{z}$为m维被控向量。由信号$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{w}$到$\boldsymbol{z}$、$\boldsymbol{y}$的传递函数矩阵$\boldsymbol{G}(s)$称为增广被控对象，$\boldsymbol{K}(s)$为控制器。$\boldsymbol{G}(s)$的状态空间实现为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{w}+\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{z}&=\boldsymbol{C}_1\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}_{11}\boldsymbol{w}+\boldsymbol{D}_{12}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}_2\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}_{21}\boldsymbol{w}+\boldsymbol{D}_{22}\boldsymbol{u}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

图1 H∞标准设计问题

式中$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}_1$，$\boldsymbol{B}_2$，$\boldsymbol{C}_1$，$\boldsymbol{C}_2$，$\boldsymbol{D}_{11}$，$\boldsymbol{D}_{12}$，$\boldsymbol{D}_{21}$，$\boldsymbol{D}_{22}$为适当维数的矩阵。在频域，有关系式

$$\boldsymbol{G}(s)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{G}_{11}(s) & \boldsymbol{G}_{12}(s)\\ \boldsymbol{G}_{21}(s) & \boldsymbol{G}_{22}(s)\end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}(s)\\ \boldsymbol{Y}(s)\end{bmatrix}=\boldsymbol{G}(s)\begin{bmatrix}\boldsymbol{W}(s)\\ \boldsymbol{U}(s)\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中$\boldsymbol{G}_{ij}(s)=\boldsymbol{D}_{ij}+\boldsymbol{C}_i(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}_j$。从$\boldsymbol{w}$到$\boldsymbol{z}$的闭环传递函数矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{zw}(s)=\boldsymbol{G}_{11}+\boldsymbol{G}_{12}K(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{G}_{22}K)^{-1}\boldsymbol{G}_{21} \tag{4}$$

H∞最优设计问题是对于给定的增广被控对象$\boldsymbol{G}(s)$，求反馈控制器$\boldsymbol{K}(s)$使得闭环系统内部稳定，且使式（4）所示矩阵的H∞范数$\|\boldsymbol{T}_{zw}(s)\|_{\infty}$最小（记此最小值为$\gamma_0$）。

H∞次优设计问题是对于给定的增广被控对象$\boldsymbol{G}(s)$和$\gamma\geqslant\gamma_0$，求反馈控制器$K(s)$使得闭环系统内部稳定，且

$$\|\boldsymbol{T}_{zw}(s)\|_{\infty}<\gamma \tag{5}$$

如果对于给定的$\boldsymbol{G}(s)$，H∞次优设计问题有解，则可通过反复递减γ，试探求次优解而求得最优控制器的逼近解。

求次优解的DGKF法（J. C. Doyle，K. Glover，P. P. Khargonekar和B. A. Francis提出），只需求解黎卡提（Riccati）方程，是广泛应用的方法。

由H∞范数可以判定稳定性。如图2所示，设传递函数矩阵$\boldsymbol{G}$和$\boldsymbol{H}$都是稳定的，则此反馈系统稳定的充分条件是

$$\|\boldsymbol{GH}\|_{\infty}<1 \tag{6}$$

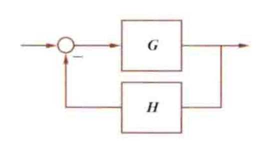


图2 反馈系统

这一结果称为小增益定理。

参考书目

申铁龙. H∞控制理论及应用. 北京：清华大学出版社，1996.

解学书，钟宜生. H∞控制理论. 北京：清华大学出版社，1994.

Hamidun-Yakebi-Beierman fangcheng

哈密顿-雅可比-贝尔曼方程 (Hamilton-JacobiBellman equation) 见动态规划。

haiba jiaozheng yinshu

海拔校正因数 (altitude correction factor) 拟用于高海拔地区的电气设备的外绝缘及干式变压器的绝缘在非高海拔地区进行试验时，应施加的试验电压与其额定耐受电压的比值。

随着海拔高度增加，空气的压力、温度、湿度等大气状态参量变化很大，电气设备外绝缘（包括干式变压器的绝缘）的放电电压下降。在高海拔地区及模拟高海拔地区的人工试验箱中得到的试验数据表明：在海拔高度高于1000m，但不超过4000m的高海拔地区，海拔高度每增加100m，电气设备外绝缘的电气强度一般较标准状态下的数值约低1%。

为了使在非高海拔地区生产的电气设备在高海拔地区能安全运行，它们的外绝缘在非高海拔地区进行试验时的试验电压U应高于额定耐受电压U_0，即$U=K_aU_0$，式中$K_a(>1)$为海拔校正因数。中国国家标准GB 311.1—2012《绝缘配合　第1部分：定义、原则和规则》中规定，海拔校正因数

$$K_a=\mathrm{e}^{q(H-1000)/8150}$$

式中H为电气设备安装地点的海拔高度，m；q为指数，取决于电压形式和试验项目，其值为1或小于1，具体取值可参见上述中国国家标准。

haishi dianqiao

海氏电桥 (Hay bridge) 见交流电桥。

hanzi guobiaoma

汉字国标码 (national standard code for Chinese character information interchange) 中国国家标准GB/T 1988—1998《信息技术　信息交换用七位编码字符集》

所描述的编码。它共有六个汉字编码字符集，分别命名为基本集、第一辅助集、第二辅助集、第三辅助集、第四辅助集和第五辅助集。

这六个字符集均采用双七位编码方式，每张代码表分为94个区和94个位，其中前15个区作为拼音文字及符号区或保留未用，16区至94区为汉字区。

基本集 GB 2312—1980《信息交换用汉字编码字符集 基本集》规定了汉字信息交换用的基本图形字符及其二进制编码表示，该字符集适用于一般汉字处理、汉字通信等系统之间的信息交换。

基本集共收汉字6763个，分为两级。它将使用频度高的常用字作为第一级汉字，共计3755个，按汉语拼音字母顺序排列；将次常用字作为第二级汉字，共计3008个，按部首排列。除汉字外，该标准还收集了一般符号202个（包括间隔符、标点符号、运算符号、单位符号和制表符号等），序号60个，数字22个，拉丁字母52个，日文假名169个，希腊字母48个，俄文字母66个，汉字拼音符号26个，汉字注音字母37个，连同汉字一共7445个图形字符。

第二、四辅助集 GB 7589—1987《信息交换用汉字编码字符集 第二辅助集》和GB 7590—1987《信息交换用汉字编码字符集 第四辅助集》所收集的都是简化汉字，作为基本集的补充，供用字量大的用户使用。其中第二辅助集收汉字7237个，第四辅助集收汉字7039个。两个字符集中的汉字均按部首排列，从代码表的第16区开始存放，前15区保留未用。这两个字符集中大约有4200多个汉字是经类推简化而得到的，极少使用。

第一、三、五辅助集 为了使简化字和繁体字之间便于进行代码转换，繁体字的编码采用了与简化字一一对应的映射方式。

第一辅助集共收集图形字符7581个，其中前15区是拼音文字及符号区，共有717个字符，除收集了基本集符号区中的682个字符外，还增加了35个竖排标点符号及汉语拼音符号。从第16区开始是汉字区，共收6864个繁体汉字，其中一级汉字3755个，二级汉字3008个，增补汉字101个。

第三、五辅助集分别收入了与第二、四辅助集对应的繁体汉字集。

为适应国际标准，中国制定了国家标准GB 13000—2010《信息技术 通用多八位编码字符集（UCS）》。该标准等同采用国际标准ISO/IEC10606·1—1993《信息技术通用多八位编码字符集（UCS）第一部分：体系结构与基本多文种平面》。它可用于世界上各种语言的书面形式以及附加符号的表示、传输、交换、处理、存储、输入及显现，是信息交换和信息处理相一致的编码方式。

GB 13000规定UCS的总体体系结构，以及规定UCS的基本多文种平面（BMP），并定义一个用于世界范围的各种文字及语言书面形式的图形字符集。规定UCS的肆八位（32位）正则形式：UCS-4；规定UCS的双八位（16位）BMP形式：UCS-2等。GB 13000规定的通用多八位编码字符集应被视为一个单一的实体，包括128个三维的组的四维编码空间。整个编码字符集应被表达为包含128个组，其中每组有256个平面。每一平面应被视为含有256行字符，每行256个字位，编码序列如表所示，任一个八位的值应由两个十六进制数字表示，其中00000030表示数字0，00000041表示拉丁字母A。当引用一个平面内的字符时，前面的四个零（表示组八位和平面八位）可以省略，其中0030表示数字0。

肆八位编码序列表

组八位	平面八位	行八行	字位八位
Group-octet	Plane-octet	Row-octet	Cell-octet

hanzi shuru/shuchu shebei

汉字输入/输出设备

（Chinese character input and output device） 计算机与人之间进行汉字信息交换的设备。汉字数量大，字形复杂，同音字多，因此需要解决汉字的输入方法，字形信息的压缩和存放，字体及字形变换等问题。

汉字输入设备 将汉字输入计算机，要解决汉字与计算机内部码之间的转换问题，输入方式有键盘输入法、识别输入法和语音输入法三种，相应地有汉字键盘、识别汉字、语音汉字三类输入设备。

汉字键盘输入设备 用手击键输入汉字的设备。有整字和编码两种键盘：①整字汉字输入键盘。将常用的约3000个汉字做在一个大键盘上，一个键对应一个汉字。为缩小键盘，在一个键上标明6～12个汉字，另配一个相应的选择键，输入一个汉字只需按二次键。这种键盘适合于专用部门。②编码汉字输入键盘。将汉字按一定规则和要求编码后，用标准字符键盘输入。常见的编码方案有：采用拼音的音码法；采用笔形、部首的形码法（如五笔字型法）；音形相结合的音形码法；根据词意文意的联想法；用记忆方法的中文电报码、国标码、区位码输入法等。除记忆法外，各类编码方法都还存在一码多字（重码）、一字多码（二义性）、规则复杂、记忆量大、不易推广等问题，需要进一步研究和优化。可以用硬件和软件方法来弥补上述不足，所以绝大多数汉字输入均采用编码键盘，并配有多种编码方法。

识别汉字输入设备 利用自动化方法将汉字送入计算机的设备。其中有：①印刷体汉字识别设备。它由扫描器将纸上的汉字字形，以点阵的形式采样输入，并转换为二进制代码由计算机接收。经过前置处理提取特征，分类后与标准模型汉字的特征比较，结合上下词义优化后进行识别。印刷体汉字字形相对稳定，因此识别比较容易。手写体汉字字形变化大，识别难度也大，但经多年的研究已达到商品的实用阶段，如手机的手写输入。②联机实时手写汉字识别设备。在书写的同时进行识别，一般采用数字化图板，书写时利用笔顺、笔画方向抽取更多的信息，对相交笔画的分剖提取时间差别信息，经分析比较后进行识别。这种汉字识别设备已进入商品化实用阶段，成为主要的汉字输入设备之一。

语音汉字输入设备 利用人的声音输入汉字的设备。有单字和多字识别系统：①单字识别系统。它根据各个字的语音参量之间的差异，经逻辑分析和判断来进行识别。②多字识别系统。它可以对多个字和一句话识别。在识别之前不同的发音者需对机器进行训练，提取特征形成标准，然后正式输入。这种汉字输入设备已有商品出售，通过完善提高，将

方便人们的汉字输入。

汉字输出设备 用计算机输出汉字，需解决由机器内码转换成汉字字形的问题。字形多数以点阵式存放，少数以模拟方式存放。汉字输出设备主要有汉字显示器和汉字打印机。

汉字显示器 将要输出汉字的字形以扫描方式呈现在显示屏上的设备。它由字符显示设备和汉字字形库组成。主要有以下几种：①阴极射线管显示器。利用与电视机相类似的扫描方法，由电子束反复以固定的速度逐行扫描，先从显示缓冲区取出相对应行的汉字代码，按代码从汉字字形库读出字形信息的第一线，依次再读出本行汉字的第二线字形信息，直至将整行汉字显示完成。还可利用显示图形的方法，将需显示的汉字字形直接存放在显示缓冲区，但这需要有较大容量的快速存储器。②等离子显示器。在两块平板玻璃中封入电离发光的气体，玻璃板上有用光刻成矩阵的透明导电电极，接受汉字字形的控制信号形成电场，使气体电离发光显示汉字。③液晶显示器。在两片敷有透明导电电极的平板玻璃夹层中，封装着光学上具有晶体性质的流体（液晶），控制透明电极上的电压可显示汉字。

汉字打印机 由计算机控制在纸上以点阵方式打印汉字的设备。原则上，任何点阵式输出设备都可以输出汉字。一般分击打式和非击打式两类：①击打式打印机。主要是针式汉字打印机。其打印头由一列直径约 0.2mm 的合金钢针和驱动它们的电磁铁组成。通常为 24 针。受汉字形信息控制，每次打击字形中的一列，打印头横向移动，即可打印出一行汉字。②非击打式打印机。主要有激光打印机、喷墨打印机、发光二极管打印机和热转印打印机等。应用较多的激光打印机是由载有汉字字形信息的光束，投射到旋转的记录硒鼓面上，鼓上预先充有均匀的电荷，由激光曝光后，失去部分电荷形成静电潜像，经干式显影呈现带有墨粉的汉字字形，受静电场作用鼓面墨粉被吸附到纸面上。经定影处理后完成汉字打印。

hanzi xinxi chuli

汉字信息处理

(Chinese character information processing) 实现计算机对汉字信息的输入输出和加工处理的技术。由于汉字是方块文字，由字组词，字种比西文字母多得多，因此汉字处理要比西文复杂，突出表现在汉字处理软件和汉字输入/输出技术等方面。但从信息处理观点看，汉字信息处理与西文信息处理均为非数值处理，两者没有本质的区别。因此在汉字信息处理中宜把汉字看成是西文字符的扩充，采用与西文兼容的处理技术，以充分利用已被长期实践所检验的大量软件财富，有利于计算机的应用与推广，扩大国际交往和程序交流。

汉字信息处理软件 使用计算机进行汉字信息处理的软件。主要有：①汉字输入处理程序。接收给定的汉字输入编码，进行同码处理，将每个汉字输入码变换成唯一的汉字机内码。②阴极射线管（CRT）汉字显示处理程序。根据汉字机内码产生相应的汉字字型，并在 CRT 上以作图方法显示出来。③汉字打印处理程序。根据汉字机内码产生相应的汉字字型，并在点阵打印机上打印出来。需要解决各种规格字型的形成和放大、旋转、检索等操作。④支持汉字处理工具软件。计算机支持汉字信息处理的工具软件，一般以应用软件形式出现，例如：汉字编辑程序、汉字库建立和维护程序、汉字字典生成程序等。这些程序一般处在用户级，所以用户可以根据自己的需要建立各种汉字处理软件工具。

前三个程序是计算机直接对汉字信息进行处理的最基本的软件，称为汉字信息加工软件。一般它也是支持汉字处理的操作系统的必要组成部分。

汉字输入/输出技术 实现汉字输入/输出设备与计算机之间传递汉字信息的处理技术。尽管汉字输入输出设备品种繁多，但从结构和实现上可分为智能型和非智能型两种。智能型汉字设备均自带汉字库和具有汉字处理能力，汉字信息加工软件一般固化在可擦可编程只读存储器（EPROM）中由智能设备执行，智能设备与主机之间信息传递为汉字机内码。非智能型汉字设备不具有汉字库和汉字处理能力，汉字信息加工软件纳入操作系统的设备驱动程序中，作为操作系统的一部分运行，汉字输入设备与主机之间传递信息为汉字图形信息。

早在 20 世纪 50 年代后期，中国就进行了俄汉机器翻译工作，但限于当时的技术和物质条件，未能实现。随着计算机的发展和客观的需要，从 20 世纪 70 年代起汉字信息处理的研究蓬勃发展，到 80 年代进入实用阶段，研制开发出一批具有汉字信息处理能力的系统和应用软件，包括汉字操作系统、网络软件、高级语言和数据库管理系统等，在单位管理、办公自动化、激光照排、情报资料检索、军事指挥等领域得到广泛的应用。20 世纪 90 年代末，汉字语音输入/输出和汉字手写体识别技术进入实用阶段。

hecheng jueyuanyou

合成绝缘油

(synthetic insulating oil) 人工合成的绝缘油，简称合成油。因矿物绝缘油制取工艺复杂、耐热性低、易燃烧、相对电容率低（作电容器介质时），不能满足各种用途对绝缘油的要求，因而发展了多种用途的合成油。20 世纪 30 年代初，美国合成了电气性能优良，且具有不燃性的极性液体多氯联苯（PCB），用作电容器油和变压器油，提高了设备的容量和安全性。但因 PCB 具有毒性及非生物降解性已被禁用。目前发展的合成油主要有芳烃合成油、硅油、聚丁烯、酯类油、少量醚类和砜类油。常用合成油的性能列于表中。一般合成油亦多采用白土净化处理，以提高其绝缘性能。白土用量约为油重的 0.5%～3%，处理温度约为 40～80℃。

芳烃合成油 常用的有十二烷基苯（DDB），$C_{12}H_{25}$。侧链中无支链时易生物降解，称为软质烷基苯，否则称为硬质烷基苯。二者的电气性能相近。它是毒性最低的合成油之一。DDB 为弱极性材料，具有优良的电气性能和热氧老化稳定性，电气强度高，吸气性较好。铜、铅、锌、锡、钢、铝对之几乎不起催化老化作用，但易使橡胶溶胀。DDB 主要用于浸渍纸和纸膜复合介质，可用作电缆、电容器和变压器的绝缘油。此外，属于芳烃合成油的还有异丙基联苯（IPB）、二芳基乙烷（PXE）、异丙基萘（DIPN）、苄基甲苯 MBT/DBT 的混合油等。它们均具有优良的电气和物理化学性能，并具有特别优良的吸气性，使用工作场强高于 DDB，可用于浸渍纸、纸膜复合介质。除 DIPN 外，均为优良的全

膜电容器的浸渍剂。

硅油　分为甲基硅油和苯甲基硅油，特点是其主链由Si—O键组成，键能很高，故耐热性优良，工作温度可达150～200℃。硅油的黏度温度特性平坦，故亦有高的耐寒性。用作绝缘油的硅油黏度约为$(20\sim50)\times10^{-6}\ m^2/s$，因硅油价格高，多用于安装在防火要求较高场所的电容器、变压器和电缆中。

常用合成油的性能

名称	简称	闪点(℃)	凝固点(℃)	运动黏度$(m^2/s)\times10^{-6}$ 40℃ (30℃)	相对电容率(80℃)	$\tan\delta$(%) 50Hz 80℃	ρ_V ($\Omega\cdot m$) 80℃	E_B (kV) 2.5mm	吸气性 (μL/min) 80℃
十二烷基苯	DDB	135	−60	9.0	2.17	0.02	2.5×10^{13}	60	−75
二芳基乙烷	PXE	148	−47.5	6.3	2.51	0.03	2.5×10^{13}	70	−130
二异丙基萘	DIPN	154	−47.5	7.5	2.48	0.03	2.5×10^{13}	70	−153
异丙基联苯	IPB	143	−50	6.5	2.55	0.04	6×10^{12}	70	−154
苄基甲苯	MBT/DBT	144	<−55	3.9	2.65	0.1	9×10^{12}	70	−120
甲基硅油	MSO	272	<−50	(48)	2.52	0.03	10^{13}	40	析气
苯甲基硅油	PMSO	280	−65	(30)	2.6	0.03	10^{13}	45	−70
聚丁烯	PB	252	−60	(85)	5.2	0.01	5×10^{13}	50	

聚丁烯　为非极性液体，其ε_r、$\tan\delta$小，介电性能与稳定性优于矿物油，具有吸气性。改变聚合度可得到黏度不同的聚丁烯，以满足钢管充油电缆和低压电容器的不同要求。

酯类油　多数酯类油的闪点高，毒性低，介电性能较好，但黏度偏大。因是极性介质，ε_r约为3～7，主要用于低压电容器。常用的酯有磷酸三甲苯酯、邻苯二甲酸酯、苄基新癸酸酯、季戊四醇酯、偏苯三酸酯等。

少数醚类和砜类油　主要有双甲苯醚和二芳基砜，其中双甲苯醚（DIE）的电气性能及物理化学性能优良，适用于膜纸及全膜电容器。二芳基砜和芳烃合成油混合在电容器中也有应用。

hezi

赫兹

（hertz）　国际单位制（SI）中频率的单位。每秒变化1周定义为1赫兹，即若周期变量的周期为1s时其频率为1赫兹。赫兹简称赫，符号是Hz。电子技术中常以千赫（kHz）或兆赫（MHz）来计量频率。

hengli

亨利

（henry）　国际单位制（SI）中自感、互感、磁导等量的单位。简称亨，符号是H。闭合电路中的电流以1A/s的均匀变化率变化，可使电路中产生1V的感应电动势时，此闭合电路的自感定义为1H。

hengding dianchang

恒定电场

（steady electric field）　伴随恒定电流而存在的电场。恒定电场中电荷以恒定的速度在导电介质中运动，形成恒定电流。要维持持续的恒定电流，要求在导电介质内部具有恒定的电场强度，需要有能够将其他形式的能量持续地转换为电能的外加直流电源。直流电源具有恒定的电动势e，它能够把正电荷在电源内从负电极移到正电极。电动势e等于沿电源内部从负电极到正电极路径l局外电场强度$\boldsymbol{E}'$（局外电场由外源产生）的线积分，即

$$e=\int_l \boldsymbol{E}'\cdot d\boldsymbol{l}$$

式中$d\boldsymbol{l}$为积分路径上的长度元。

恒定传导电流　除了真空以外，所有的物体都具有一定数量的自由电子或离子，只是数量级有差别。如果把物体与直流电源相连接，在$\boldsymbol{E}'$的作用下，就有可能在物体内部形成恒定电流，电流的大小取决于物体导电性能的强弱。衡量物体导电性能的电参数是电导率γ。良导体的γ大约为$10^6\sim10^7$ S/m，而良绝缘体的γ可以小到10^{-16} S/m。在忽略了极微弱的传导电流情况下，绝缘体内的电场可按静电场来分析。物体内部的自由电子或离子在恒定电场作用下，发生恒速宏观运动，这样的电流叫恒定传导电流。恒定的传导电流流过物体时，运动电荷与物体晶格相互作用，产生不可逆的能量转换，物体发热损失能量；要维持恒定电流，需要外加直流电源来提供能量，所以外加直流电源是恒定电场不可缺少的场源。

电流密度　当物体中有恒定电流流通时，物体内部各点处的电流可能方向不同，电流的密度也不尽相同，特别是物体具有不均匀的截面时更是如此。因此在恒定电场中常采用电流密度矢量$\boldsymbol{J}$来表示各点处的电荷运动情况。流过物体整个截面S的电流为$I=\int_S \boldsymbol{J}\cdot d\boldsymbol{S}$。$\boldsymbol{J}$是通过面元$d\boldsymbol{S}$处的电流密度，方向是该处正电荷流动方向。电流密度的单位是安［培］每平方米（A/m^2）。$\boldsymbol{J}$是描述恒定电场的一个重要物理量。

恒定电场的基本方程　导电体与直流电源接通后，沿整个电流回路l有

$$\oint_l(\boldsymbol{E}'+\boldsymbol{E})\cdot d\boldsymbol{l}=e$$

根据电流连续性原理，在恒定电场中，电荷以恒速运动，物体内部电荷分布处于动态平衡，电荷体密度不随时间而变，因此电流密度遵循积分形式的电流连续性原理

$$\oint_S \boldsymbol{J}\cdot d\boldsymbol{S}=0$$

恒定电场中$\boldsymbol{J}$与$\boldsymbol{E}$的关系　在电源内部区域有关系式$\boldsymbol{J}=\gamma(\boldsymbol{E}+\boldsymbol{E}')$，$\gamma$是电源内部介质的电导率。在工程实际问题中，通常人们主要关心的是电源外部导电物体内的恒定电场，此时$\boldsymbol{E}'=\boldsymbol{0}$，于是

$$\boldsymbol{J}=\gamma\boldsymbol{E}$$

式中γ为电源外部介质的电导率。

同样，在电源外部导体区域内任取一闭合路径l，有$\oint_l \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l}=0$（因$\boldsymbol{E}'$为零），相应地有$\nabla\times\boldsymbol{E}=\boldsymbol{0}$。该物体区域内仍可引入电位$\varphi$，满足$\boldsymbol{E}=-\nabla\varphi$。

静电比拟　比较静电场与恒定电场的基本方程可知，静电场中没有电荷体密度 ρ 的分布区域和恒定电场中电源外部导电物体内两种情况下，$\nabla \cdot \boldsymbol{D}=0$ 与 $\nabla \cdot \boldsymbol{J}=0$ 对应（$\boldsymbol{D}$ 是电通密度），两种介质内电场都满足形式 $\nabla \times \boldsymbol{E}=0$，而介质的本构方程 $\boldsymbol{D}=\varepsilon \boldsymbol{E}$ 与 $\boldsymbol{J}=\gamma \boldsymbol{E}$ 又相对应（ε 是介质的电容率）。这两种情况的数学形式相同，如果两种电场的边界形状也完全一样，则这两种电场的求解完全可以相互比拟。求出其中一种电场的解答后，只要将对应的物理量（如 $\boldsymbol{J}$ 与 $\boldsymbol{D}$，γ 与 ε）进行替换，即可得到另一种电场的解答。这样的处理方法叫静电比拟。由于恒定电场易于实现和便于测量，所以在工程中被用来比拟其他具有相似条件的另一类物理场，并在模拟研究中得到广泛应用。此外，电工技术中的绝缘电阻或接地电阻的计算，也可利用静电场的电容公式或计算方法，作相应的比拟替换。

hugangi jiaoyanyi

互感器校验仪　(instrument transformer calibrator)

测定互感器比差和角差的仪器。

电流互感器校验仪的原理电路见图 1，相应的电流差（电压差）相量图见图 2。设被校验电流（或电压）互感器 T1 的二次电流相量为 $\underline{I}_{2x}$（或二次电压相量 $\underline{U}_{2x}$），标准电流互感器 T2 提供的标准二次电流相量为 $\underline{I}_{20}$（或标准二次电压相量 $\underline{U}_{20}$），两者之差为 $\Delta\underline{I}$（或 $\Delta\underline{U}$）。若将 $\Delta\underline{I}$ 分解为与 $\underline{I}_{20}$ 同相的分量 $\Delta\underline{I}_1$ 和垂直的分量 $\Delta\underline{I}_2$（或将 $\Delta\underline{U}$ 分解为与 $\underline{U}_{20}$ 同相的分量 $\Delta\underline{U}_1$ 和垂直的分量 $\Delta\underline{U}_2$），则被校电流互感器的比差 $f=\dfrac{I_{2x}-I_{20}}{I_{20}}\times 100\% \approx \dfrac{\Delta I_1}{I_{20}}\times 100\%$，角差 $\delta \approx \dfrac{\Delta I_2}{I_{20}}$（以弧度表示）。对被校电压互感器，比差 $f \approx \dfrac{\Delta U_1}{U_{20}}\times 100\%$，角差 $\delta=\dfrac{\Delta U_2}{U_{20}}$。

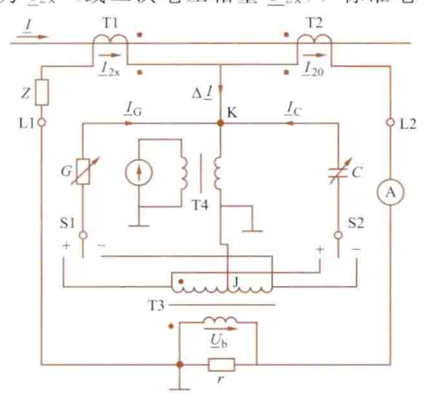


图 1　电流互感器校验仪原理接线图

标准电流 $\underline{I}_{20}$ 通过电阻 r 变换为电压 $\underline{U}_b$（校验电压互感器时，电压 $\underline{U}_b$ 得自标准电压 $\underline{U}_{20}$）。$\underline{U}_b$ 加到变压器 T3，其二次绕组的两端经倒反相位的开关 S1 和 S2 分别接到可变电导 G 和可变电容 C。T3 二次绕组的中点 J 接至比较仪 T4 的一次侧。流经 G 和 C 的电流 $\underline{I}_G$ 和 $\underline{I}_C$ 就作为与 $\underline{I}_{20}$（或 $\underline{U}_{20}$）同相和相位差为 90° 的标准电流分量。

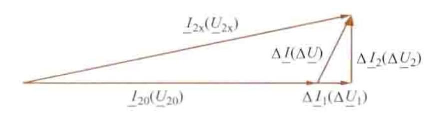


图 2　电流差（电压差）的相量图

$\Delta\underline{I}$ 与 $\underline{I}_G$、$\underline{I}_C$ 同时经 K 点流入电流比较仪 T4 的一次绕组。当接于 T4 的二次绕组的检测仪表指零时，即有 $\underline{I}_G+\underline{I}_C+\Delta\underline{I}=\underline{I}_G+\underline{I}_C+\Delta\underline{I}_1+\Delta\underline{I}_2=0$，或 $\underline{I}_G=\Delta\underline{I}_1$ 和 $\underline{I}_C=\Delta\underline{I}_2$，由 G 和 C 的值可求得 ΔI_1 和 ΔI_2。通常由 G 和 C 的刻度可直接读出比差 f 和角差 δ 的数值。校验电压互感器时，要将 $\Delta\underline{U}$ 经电阻转换为电流差 $\Delta\underline{I}$，再与 $\underline{I}_G$ 和 $\underline{I}_C$ 经 K 点共同加到 T4。调节 G 和 C 使检测仪表指零，可由 G 和 C 的刻度读出电压互感器的比差和角差值。图 3 所示为全功能互感器校验仪。



图 3　HEW99 全功能互感器校验仪
（宁波三维公司 提供）

根据国家计量检定规程 JJG 1021—2007《电力互感器检定规程》规定：由校验仪灵敏度和最小分度值所引起的测量误差，分别不得大于被校互感器允许误差的 1/20 和 1/15。互感器校验仪本身的准确度一般为 0.5%～3%，由于这是差值的测量误差，因而可忽略不计。

hulianwang

互联网　(internet)

由网络与网络之间所串连成的庞大网络。又称因特网。这些网络以一组通用的协议相连，形成逻辑上的单一巨大国际网络。这种将计算机网络互相联接在一起的方法可称作“网络互联”，在此基础上发展出世界上最大的全球性互联网络称“互联网”。

协议　可以分为底层、中间层和顶层三层协议。

（1）底层协议。IP（internet protocol）协议，是用于报文交换网络的一种面向数据的协议，这一协议定义了数据包在网际传送时的格式。目前使用最多的是 IPv4 版本，这一版本中用 32 位定义 IP 地址，尽管地址总数达到 43 亿，但是仍然不能满足现今全球网络飞速发展的需求，因此 IPv6 版本应运而生。在 IPv6 版本中，IP 地址共有 128 位。

（2）中间层协议。UDP（user datagram protocol）协议和 TCP（transmission control protocol）协议，它们用于控制数据流的传输。UDP 是一种不可靠的数据流传输协议，仅为网络层和应用层之间提供简单的接口。而 TCP 协议则具有高的可靠性，通过为数据报加入额外信息，并提供重发机制，它能够保证数据不丢包、没有冗余包以及保证数据报的顺序。对于一些需要高可靠性的应用，可以选择 TCP 协议；相反，对于性能优先考虑的应用如流媒体等，则可以选择 UDP 协议。

（3）顶层协议。一些应用层协议，这些协议定义了一些用于通用应用的数据报结构，其中包括：

DNS（domain name system）：域名服务；

FTP（file transfer protocol）：服务使用的是文件传输协议；

HTTP（hypertext transfer protocol）：所有的 Web 页面服务都是使用的超级文本传输协议；

POP3（post office protocol 3）：邮局协议；

SMTP（simple mail transfer protocol）：简单邮件传输协议；

Telnet：远程登录等。

网络接入技术　用户与互联网间接入方式和结构的总称。任何需要使用互联网的计算机必须通过某种方式与互联

网进行连接。互联网接入技术的发展非常迅速：带宽由最初的14.4kbit/s发展到10Mbit/s甚至100Mbit/s带宽；接入方式也由过去单一的电话拨号方式，发展成现在多样的有线和无线接入方式；接入终端也开始朝向移动设备发展，并且更新更快的接入方式仍在继续地研究和开发。

根据接入后数据传输的速度，互联网的接入方式可分为宽带接入和窄频接入。

（1）常见民用宽带接入。①非对称数字专线ADSL（asymmetric digital subscriber line）接入，接入带宽上行速率（最高640kbit/s）和下行速率（最高8Mbit/s）；②有线电视上网（通过有线电视网络）接入，接入带宽3～34Mbit/s；③光纤接入，接入带宽10、100、1000Mbit/s；④无线［使用IEEE 802.11协议或使用第三代移动通信（3G）］宽带接入，1.5～540Mbit/s；⑤人造卫星宽带接入。

（2）常见民用窄频接入。①电话拨号接入，接入带宽9600bit/s～56kbit/s（V.92标准）；②窄频ISDN（integrated services digital network）接入，接入带宽64/128kbit/s；③GPRS（general packet radio service）手机上网，接入带宽最大53kbit/s；④UMTS（universal mobile telecommunications system）手机上网，384kbit/s；⑤CDMA（code division multiple access）手机上网：2G（Generation）CDMAOne，150kbit/s。

发展　全球互联网自20世纪90年代进入商用以来迅速拓展，目前已经成为当今世界推动经济发展和社会进步的重要信息基础设施。1991年8月6日，万维网（world wide web）公共服务首次亮相，它是一个由许多互相链接的超文本组成的系统，通过互联网来访问。经过短短二十几年的发展，全球互联网已经覆盖五大洲的许多国家和地区，同时，推动了全球信息化进程。经过多年的发展，互联网已经在社会的各个层面为全人类提供便利。但是随之而来的不全是正面的影响，垃圾邮件、网络蠕虫病毒、恶意代码、恶意软件等也影响者人们的正常生活。

huyi dingli

互易定理

（reciprocity theorem）　描述由线性电阻组成的二端口网络中，激励端口和响应端口互换位置的定理。在单一激励的情况下，当激励端口和响应端口互换位置时，响应不因这种互换位置而有所改变。

互易定理有两种形式，一种形式是激励端口接电压源，响应端口短路；另一种形式是激励端口接电流源，响应端口开路。

（1）激励端口接电压源u_S，响应端口短路。响应是指短路支路中的电流i_2［见图1（a）］；若将电压源u_S和短路支路互换位置，则此时的响应$\hat{i}_1$［见图1（b）］应与i_2相等，即$\hat{i}_1=i_2$。

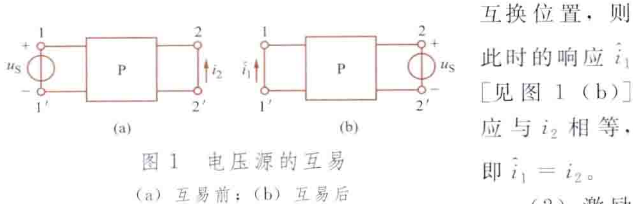


图1　电压源的互易

（a）互易前；（b）互易后

（2）激励端口接电流源i_S，响应端口开路。响应是指开路端口的电压u_2［见图2（a）］；若将电流源i_S和开路支路互换端口位置，则此时的响应$\hat{u}_1$［见图2（b）］应与u_2相等，即$\hat{u}_1=u_2$。

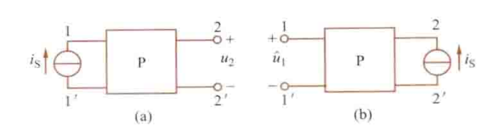


图2　电流源的互易

（a）互易前；（b）互易后

对于只含电阻、电感、电容的线性非时变网络，在分析电路的正弦稳态响应和零状态响应时，互易定理也同样适用。

利用互易定理有时可以简化电路的分析和计算。

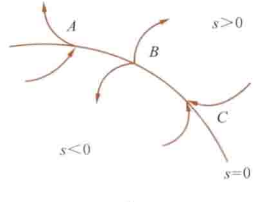
huamo kongzhi

滑模控制

（sliding mode control）　通过不连续的控制信号，迫使系统状态变量沿着给定的相轨迹滑动到期望点的一种变结构控制。变结构控制是一种不连续的非线性控制，该控制方法基于系统的当前状态，不断地切换控制律，对系统进行动态调节。

基本原理　假设在状态空间中有一切换面$s(\boldsymbol{x})=0$，如图所示，它将状态空间分成两部分$s>0$及$s<0$。

切换面上的运动点有通常点、起始点和终止点三种情况。①通常点，系统状态运动到切换面附近并穿越通过的运动点（图中点A）。②起始点，系统状态从切换面上向两边离开的运动点（图中点B）。③终止点，系统状态从两边趋向切换面的运动点（图中点C）。



切换面

在滑模控制中，希望切换面某一区域上的点都是终止点。那么，一旦运动点趋近该区域时，就被“吸引”在该区域上运动。切换面$s=0$上的所有点都是终止点的区域被称为“滑动模态”区，简称“滑模”区。系统在滑模区的运动就叫做滑模运动。对于一个控制系统，其状态方程为

$$\dot{x}=f(x,u,t)\quad \boldsymbol{x}\in R^n,u\in R^m,t\in R \tag{1}$$

确定切换函数$s(\boldsymbol{x})$，和相应的控制律

$$u=\begin{cases}u^+(x) & s(x)>0\\ u^-(x) & s(x)<0\end{cases} \tag{2}$$

其中

$$u^+(x)\neq u^-(x) \tag{3}$$

使得系统具有滑动模态，从而系统的运动点趋近于切换面时，就被“吸引”在该区域上运动，直至沿着该曲面渐近稳定到平衡点。滑模控制中，控制律u不是连续时间函数，它须根据系统的当前状态，在不同的结构之间进行切换。因此，滑模控制是一种变结构控制。

需满足的条件　需要满足三个条件：滑动模态的存在性、滑动模态的可达性和滑模运动的稳定性。

（1）滑动模态的存在性。按照滑模区上的点都必须是终止点这一要求，当系统运动点到达切换面附近时，必须满足：

$$\lim_{s\to0^+}\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\leqslant0\text{ 及 }\lim_{s\to0^-}\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\geqslant0 \tag{4}$$

或写作

$$\lim_{s\to0}s\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\leqslant0 \tag{5}$$

（2）滑动模态的可达性。如果系统的初始点$x(0)$不在切换面附近，而是在状态空间的任意位置，此时要求系统的状态运动点必须趋向于切换面$s=0$。将式（5）中的极限符号去掉，变成

$$s\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\leqslant 0 \quad (6)$$

表示状态空间中的任意点必将向切换面 $s=0$ 靠近。

（3）滑模运动的稳定性。如果切换面 $s(x)=0$ 包含状态方程的一个稳定平衡点 $x=x_c$，且滑模运动在 $x=x_c$ 附近渐近稳定，则系统在滑动模态下的运动是渐近稳定的（稳定于 x_c）。

滑模控制系统的设计　滑模控制使系统状态运动点先从初始位置向切换面趋近，然后沿着切换面做滑模运动。滑模控制系统的设计分为切换函数的选择和滑模控制律的设计两部分。①切换函数 $s(x)$ 的选择。$s(x)$ 要能够保证系统在滑动模态下的运动是渐近稳定的，同时还要尽可能使系统有好的动态品质。②滑模控制律的设计。所得到的控制律 u 需要保证滑动模态的存在性和可达性，并且在趋近过程中，速度要快、抖振要小。

优点　能够克服系统的不确定性，对干扰具有很强的鲁棒性，尤其是对非线性系统的控制具有良好的控制效果。由于滑模变结构控制系统算法简单，响应速度快，对外界噪声干扰和参数摄动具有很强的鲁棒性，在机器人控制领域得到了广泛的应用，也有学者将滑模变结构方法应用于空间机器人控制。变结构控制作为非线性控制的重要方法近年来得到了广泛深入的研究，其中一个重要的研究分支是抑制切换震颤，这方面已取得了不小的进展，并提出了等效控制、切换控制与模糊控制的组合模糊调整控制方法，其中等效控制用来配置极点，切换控制用来保证不确定外扰存在下的到达过程，模糊调整控制则用来提高控制性能并减少震颤。

参考书目

田宏奇．滑模控制理论及其应用．武汉：武汉出版社，1995.

刘金琨．滑模变结构控制 MATLAB 仿真．北京：清华大学出版社，2005.

huahewu bandaoti cailiao

化合物半导体材料

（compound semiconductor materials）　具有半导体性质的化合物。这类半导体材料种类很多。Ⅲ族元素硼、铝、镓、铟和Ⅴ族元素氮、磷、砷、锑可组成16种二元Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体，为闪锌矿型或纤维锌矿型结构。Ⅱ族元素锌、镉、汞，Ⅳ族元素铅和Ⅵ族元素硫、硒、碲，组成12种Ⅱ-Ⅳ和Ⅳ-族化合物半导体。含有二种同族元素的三元或四元系化合物半导体其组合数更多。镓系四种Ⅲ-Ⅴ族化合物中砷化镓、磷化镓获得广泛的应用，室温下，砷化镓的禁带宽度E_g为1.42eV，电子迁移率比硅大数倍，为直接带隙半导体，很受重视。磷化镓的E_g为2.26eV，为间接带隙半导体，用于可见光发光材料。铟系除氮化铟外，锑化铟和砷化铟的电子迁移率大，可作霍耳器件。锑化铟的E_g为0.18eV，可用于红外光电器件。磷化铟可用于四元系长波长激光器衬底材料。三元、四元化合物较成熟的有 GaAsP、AlGaAs、GaInP、InAsP、InGaAsP、AlGaAsSb 等。Ⅱ-Ⅵ族化合物属六方或立方晶系，为直接带隙半导体，用于发光、激光、红外器件。硫化铅、硒化铅、碲化铅均为氯化钠型结构，为直接带隙半导体，为光电、热电材料。三元化合物 HgCdTe、PbSnTe 是很受重视的红外光电材料。此外，Ⅰ-Ⅴ族、Ⅰ-Ⅵ族、Ⅱ-Ⅳ族、Ⅱ-Ⅴ族、Ⅲ-Ⅵ族、其他Ⅳ-Ⅳ族、Ⅴ-Ⅵ族以及Ⅰ-Ⅲ-Ⅵ族、Ⅰ-Ⅴ-Ⅵ族、Ⅱ-Ⅲ-Ⅵ族、Ⅱ-Ⅳ-Ⅴ族等三元化合物有许多都是半导体材料。另外，许多金属氧化物也属半导体材料。

huanjie

环节

（element）　组成控制系统的、可用最基本的典型的微分方程或传递函数描述的元件或部件。有以下几种典型的环节：比例环节、一阶惯性环节、微分环节、积分环节、振荡环节、二阶惯性环节和纯滞后环节。众多复杂的控制系统都是由上述典型环节以不同方式串联、并联、反馈组成的。

比例环节　输出量与输入量成比例的环节，也称为“无惯性环节”，可以表示为

$$y=Kx$$

式中 y 为输出量；x 为输入量；K 为该环节的放大系数。机械杠杆、齿轮系、电位计以及电子放大器（在特性曲线的直线部分工作）等，都是比例环节。

一阶惯性环节　输入量的作用不立即在输出端全部表现出来，而是有一定的延缓，也就是说有惯性的环节。图1（a）是由 RC 串联电路构成的一阶惯性环节以及一个比例环节。可以写出电容器上电压 u_C 与输入电压 u_i 关系式为

$$T\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=\mathrm{d}u_i$$

式中 $T=RC$ 是电路的时间常数。经过比例环节后，输出电压为 $u_o=Ku_C$，因而得 u_o与 u_i的关系式为

$$T\frac{\mathrm{d}u_o}{\mathrm{d}t}+u_o=Ku_i$$

式中 $T=RC$ 是电路的时间常数。图1（b）所示，输入端加上一个阶跃量 u_i，输出量以指数规律逐渐上升，最后趋于稳态值。也可以不经比例环节，即$K=1$。

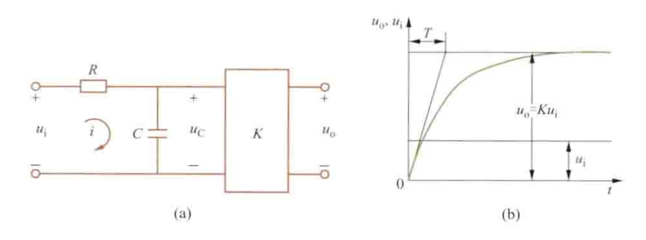


图1　RC 电路一阶惯性环节

（a）原理图；（b）动态特性

微分环节　输出量与输入量关于时间的导数成正比的环节。图2（a）表示由 RC 电路构成的微分环节以及一个比例环节。微分环节的方程为 $u_R+\frac{1}{RC}\int_0^t u_R\mathrm{d}t=u_i$，连同比例环节，有 $u_o=Ku_R$，$T\frac{\mathrm{d}u_o}{\mathrm{d}t}+u_o=KT\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}$。电路的时间常数$T=RC$ 数值很小而放大系数 K 很大时，可近似地得到关系式

$$u_o=KT\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}$$

即输出量与输入量关于时间的导数成正比。

积分环节　输出量与输入量的积分成比例的环节。图3表示的小惯量直流伺服机，是积分环节以及一个比例环节的例子。

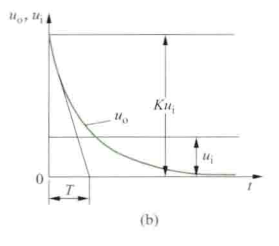


图 2　*RC* 电路微分环节

(a) 原理图；(b) 动态特性

电枢电压 u_a 为环节的输入量，当励磁绕组加以恒值直流电压并忽略电枢回路的时间常数时，电动机电枢转过的角度 θ 为

$$\theta = K\int u_a \mathrm{d}t$$

式中 K 为常数。

当输入量 x_i 为常数时，输出量 x_o 是按一定斜率增长的直线，如图 4 所示。

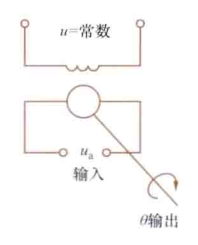


图 3　小惯量直流伺服机

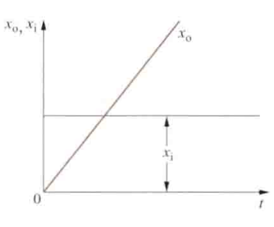
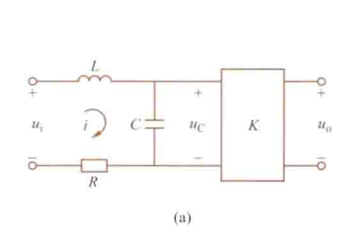


图 4　积分环节的动态特性

二阶环节　（振荡环节和二阶惯性环节）图 5 (a) 所示的，由电感 L、电容 C 和电阻 R 串联组成的电路是二阶环节的例子，它和一个比例环节在一起，可以写出如下方程

$$T_1 T_2 \frac{\mathrm{d}^2 u_o}{\mathrm{d}t^2} + T_1 \frac{\mathrm{d}u_o}{\mathrm{d}t} + u_o = K u_i$$

式中 $T_1 = RC$，$T_2 = L/R$。



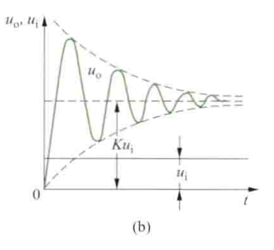


图 5　*RLC* 串联电路二阶环节

(a) 原理图；(b) 作为振荡环节时的动态特性

二阶环节的特征方程有两个根 p_1 和 p_2。若 p_1 和 p_2 是具有负实部的共轭复数，则 u_o 将是逐渐衰减的振荡过程，如图 5 (b) 所示，这样的二阶环节是振荡环节。若 p_1 和 p_2 是负实数，则 u_o 的动态特性是非周期性的，这样的二阶环节是二阶惯性环节。

纯滞后环节　输出比输入滞后一定时间的环节，其方程为

$$y(t) = x(t-\tau)$$

式中 $y(t)$ 为输出量，$x(t)$ 为输入量，τ 为纯滞后时间。

huanjing youhao jueyuan cailiao

环境友好绝缘材料　(environmentally friendly insulating materials)　在设计、生产、运输、使用和废弃过程中，不对环境和人类造成有害影响的绝缘材料。

电工、电子领域中使用的绝缘材料种类繁多，很多绝缘材料是经由化学方法合成的，在其生产过程中会污染周围环境；在使用过程中，由于该类材料的特殊使用环境，也会有污染周围环境的可能。电工领域中广泛使用的 SF_6 气体，如泄漏到大气环境中，其温室效应是 CO_2 气体的 22 200倍；SF_6 在使用过程中如受到高温电弧的作用，会分解出有毒气体 S_2F_{10} 等。使用寿命长的绝缘材料，往往具有优异的化学稳定性，废弃后难以自然降解，从而对环境造成有害影响。

2005 年 2 月 16 日生效的《联合国气候变化框架公约——京都议定书》列出了要求减排的 6 种温室气体，其中包含电工领域中广泛使用的 SF_6 气体。2006 年 7 月 1 日起，欧盟禁止在市场销售含有铅、汞、镉、六价铬、多溴二苯醚和多溴联苯六种有害物质的电气电子设备。

近年来，人们对环境友好绝缘气体、绝缘液体和固体绝缘材料开展了全面研究。在绝缘气体中，对一些含有 F 原子的其他电负性气体进行研究，它们的电负性与 SF_6 相近，但其中一些气体例如八氟环丁烷（c-C_4F_8）、全氟丙烷（C_3F_8）、全氟乙烷（C_2F_6）的温室效应比 SF_6 要小得多。

在绝缘油中，植物绝缘油的生物降解率大于 97%，是一种环境友好型液体绝缘介质。植物油来源于天然的油料作物，其主要成分是甘油三脂肪酸酯，此外还含有少量的能溶于油脂的类脂物。精炼后，植物绝缘油的闪点和燃点都显著高于矿物绝缘油，也高于大多数合成绝缘油。植物绝缘油具有良好的电气性能，其工频击穿场强明显高于其他绝缘油。植物绝缘油的缺点是凝点较高（一般在 −25～−15℃），低温黏度大，易氧化等。因此，需要加强这些方面的研究，例如采用复合技术、纳米技术和微胶囊技术，以提高抗氧化剂的时效性。

热塑性塑料是环境友好材料，可以充分地二次利用。由于热固性塑料不易回收利用，因此在选择材料时，若两种塑料的功能性和价格相差不多，则首选环境较友好的热塑性塑料。普通热塑性塑料的缺点是耐热性较差，尺寸不够稳定。但是，某些热塑性塑料，包括聚苯醚（PPO）、聚甲醛（POM）等，却具有耐热性高、尺寸稳定的优点。

无机粉体改性固态有机绝缘材料是一种典型的环境友好材料，具有经济性、使用性、适用性和环境协调性等基本特性。这种材料的环境友好性主要表现在：减少了合成树脂的使用量；无机粉体促进固态有机绝缘材料与土壤同化；无机粉体有利于固态有机绝缘材料的焚烧；无机粉体大部分是无毒的。

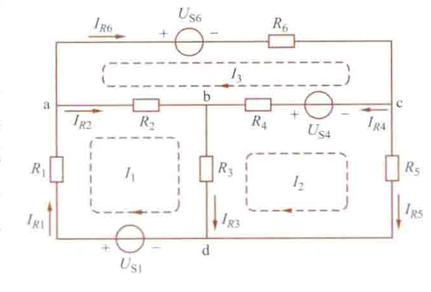
在保证产品的使用性能及经济性的前提下，在产品设计中考虑环境因素。对环境因素的研究，要从定量和定性两个角度出发，需借助一些相关产品的环境评估软件。在电气电子领域，基于材料的生命周期评价方法（life circle assessment，LCA），已经开发出一些环境评估软件和数据库。

huilufa

回路法　(loop analysis)　以假想的回路电流作为待求量来求解电路问题的方法。

回路电流　回路电流是假想的沿着回路流动的电流。图示电路图中，回路电流 I_1、I_2、I_3 用带箭头的虚线表示。箭

头代表回路电流方向。回路电流 I_1 沿回路 abda 流动，即 I_1 流经电压源 U_{S1} 和电阻 R_1、R_2、R_3。回路电流 I_2 流经电压源 U_{S4} 和电阻 R_3、R_4、R_5。回路电流 I_3 流经电压源 U_{S4}、U_{S6} 和电阻 R_4、R_2、R_6。



电路图

支路电流和回路电流的关系　每条支路里的实际电流可由回路电流求出。支路电流等于流经该支路的所有回路电流的代数和。图示电路图中的 6 个支路电流 $I_{R1} \sim I_{R6}$ 为

$$I_{R1} = I_1, \quad I_{R5} = I_2, \quad I_{R6} = I_3$$

$$I_{R2} = I_1 - I_3, I_{R3} = I_1 - I_2, I_{R4} = I_3 - I_2$$

回路法方程的建立　对于只含有理想电压源和电阻的平面电阻网络（将电路图画在平面上后不出现交叉支路的网络），选择每个网孔作为一个回路，规定回路方向为顺时针或反时针旋转方向。在每个回路里，假设回路电流沿着回路方向流动。将回路和回路电流按顺序编号，后者记作 I_1，I_2，…，I_l，这里 l 是回路数，也是回路电流数。回路法方程形式如下

$$\begin{gathered}R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + \cdots + R_{1l}I_l = U_{S11}\\ R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + \cdots + R_{2l}I_l = U_{S22}\\ \vdots\\ R_{l1}I_1 + R_{l2}I_2 + \cdots + R_{ll}I_l = U_{Sll}\end{gathered}$$

式中 R_{kk} 等于第 k 个回路中所有电阻之和（$k=1, 2, \cdots, l$），称 R_{kk} 为 k 回路的自电阻。$R_{ij}=R_{ji}=(-1)\times$（第 i 个回路和第 j 个回路共有的电阻）（$i\neq j$，$i=1, 2, \cdots, l$；$j=1, 2, \cdots, l$），称 R_{jk} 为 j 回路与 k 回路的互电阻。U_{Skk} 等于第 k 个回路中所有电压源沿回路方向压升的代数和（$k=1, 2, \cdots, l$）。以图示电路图为例，回路数 $l=3$，有三个回路电流 I_1、I_2 与 I_3，自电阻 $R_{11}=R_1+R_2+R_3$，$R_{22}=R_3+R_4+R_5$，$R_{33}=R_4+R_2+R_6$，互电阻 $R_{12}=R_{21}=-R_3$，$R_{13}=R_{31}=-R_2$，$R_{23}=R_{32}=-R_4$，$U_{S11}=U_{S1}$，$U_{S22}=-U_{S4}$，$U_{S33}=U_{S4}-U_{S6}$。若所有电压源和所有电阻的值是已知量，由列出的回路法方程可解出三个回路电流，再根据支路电流和回路电流的关系可算出全部支路电流。

huibian chengxu

汇编程序

（assembler）　把汇编语言书写的程序翻译成与之等价的机器语言程序的处理程序。这里汇编语言写的程序称为源程序，它作为汇编程序的输入，经翻译以后，输出的机器语言的程序称为目标程序。汇编语言是一种面向机器的低级语言，包含汇编执行指令和伪指令两个基本部分。汇编执行指令是机器指令的符号化表示，它们基本上保持着一一对应的关系；伪指令则向汇编程序提供必要的信息，包括用户自定义符号、数据类型、数据空间的长度、目标程序的格式、存放位置安排等。现在许多机器上的汇编程序又吸收了宏加工程序及编译中的技术，研制出宏汇编程序及高级汇编程序。

由于汇编语言的执行指令与机器指令一一对应，因而目标程序占用内存空间小，运行效率高，可以直接使用计算机系统中各种资源。汇编语言的缺点是可读性差，维护困难，由于面向机器致使难以向其他机种移植。它通常用于编写系统的核心程序，或编写需要耗费大量运行时间和实时性要求较高的程序。

汇编程序按其功能和结构可分为简单汇编程序、模块汇编程序、条件汇编程序、宏汇编程序和高级汇编程序等。

（1）简单汇编程序。其特点是经过翻译后的机器语言目标程序的地址是绝对的，可直接放在内存中执行，也称为“装入并执行”式汇编程序。这种工作方式在内存空间组织上受到很大限制。

（2）模块汇编程序。可提供设计、编码和调试不同程序模块的能力，每个汇编后的程序模块称为目标模块，它们的地址是相对的，可用连接装配程序把多个目标模块组成一个可执行的程序。

（3）条件汇编程序。具有选择汇编某些程序段的功能。这种汇编程序通常具有“条件转移”等伪指令，以便用户编写选择条件。

（4）宏汇编程序。具有宏加工功能的汇编程序。可以用它定义含参数的程序段，在使用的位置上调用它们，汇编时将进行宏（指令）展开，把宏定义所预先定义的指令目标代码插在该位置上。

（5）高级汇编程序。具有控制结构（条件语句、循环语句以至含有函数和过程等）的汇编程序。它能在保持目标程序质量高的同时，吸收高级语言的优点，提高可读性。

hundun

混沌

（chaos）　确定性非线性系统中物理量因对初始状态具有敏感依赖而产生无规则变化的现象。确定性是指系统中不存在随机现象；非线性是指系统的激励和响应之间不满足线性关系，对电路系统而言是指其中至少含有一个不是外加激励的非线性元件；初值敏感依赖性是指系统初始状态任何微小的变动，在足够长时间之后都会形成系统运行形态显著的改变。针对一个具有混沌解的系统，考察只有微小差异的两个初始状态对应的解，这两个解都表现出无规则性。在初始时刻后一段时间内这两个解比较靠近，但随着时间的增长，二者差异不断地增大，不规则变化显著不同。

1961 年，气象学家 E. 洛伦兹（E. Lorenz）用计算机求解某个气象问题时，观察到初始条件稍微改变后，方程的解起了显著改变，由此发现了混沌。洛伦兹方程是三维欧式空间中的状态方程，可写成下面的形式

$$\begin{cases}\dot{x} = a(y-x)\\ \dot{y} = bx - y - xz\\ \dot{z} = -cz + xy\end{cases}$$

当方程中的参数 a、b、c 取某些特定值，比如 $a=16$、$b=45.92$、$c=4$ 时，该方程数值解无规则可循。图 1 所示为洛伦兹方程中的状态变量 $x(t)$ 在两个相差极小的初值下随时间变化的曲线，从中可清晰观察到该系统对初始状态的敏感依赖性。图 2 所示为洛伦兹方程一维混沌曲线，图 3 所示为洛伦兹方程三维空间混沌轨线。

20 世纪中后叶，在气象、物理、化学、生物、力学、工程技术等学科中，都发现了混沌现象。混沌是 20 世纪重大发

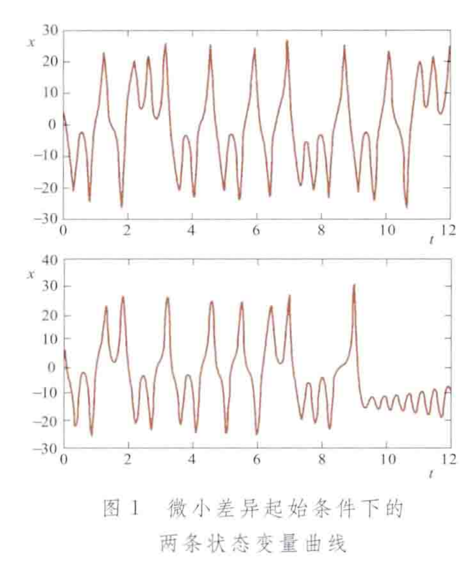


图 1 微小差异起始条件下的两条状态变量曲线

现之一。近50年来，对电系统中混沌的研究也取得了长足进展。不仅在电路和电力系统中发现了大量混沌现象，通过电路设计可以产生各种形式的混沌现象，而且以电系统为媒介还可将混沌用于控制、加密和通信等多个领域，实现特殊用途。非线性电路中的混沌现象是混沌研究的重要分支之一。

非线性电路或系统是否会出现混沌与电路或系统的维数有关。可以通过计算非线性系统的最大李雅普诺夫指数（Lyapunov Exponent）来判断是否出现混沌。

电路维数和混沌的关系 在交流电源激励的二维（或二维以上）非线性模拟电路中，例如在正弦电压源，非时变线性电阻、电感和变容二极管（非时变非线性电容）组成的非线性串联电路中，可能出现混沌。在直流电源激励的三维（或三维以上）非线性模拟电路中，也可能出现混沌。不同于模拟电路或系统，一维非线性迭代系统也可能出现混沌。

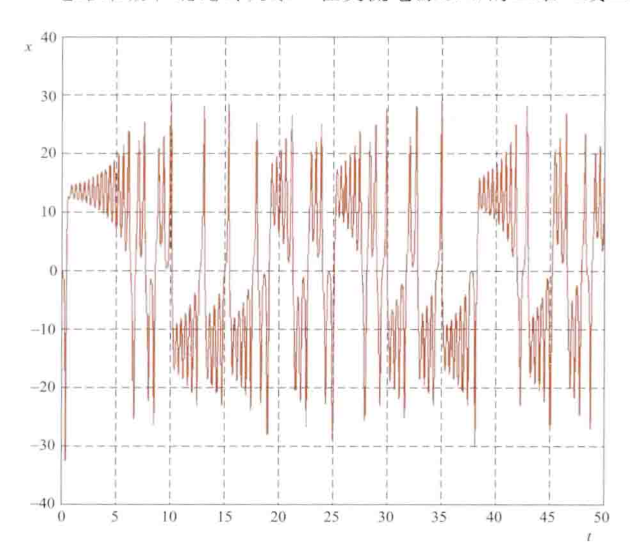


图 2 洛伦兹方程一维混沌曲线（汪芙平 提供）

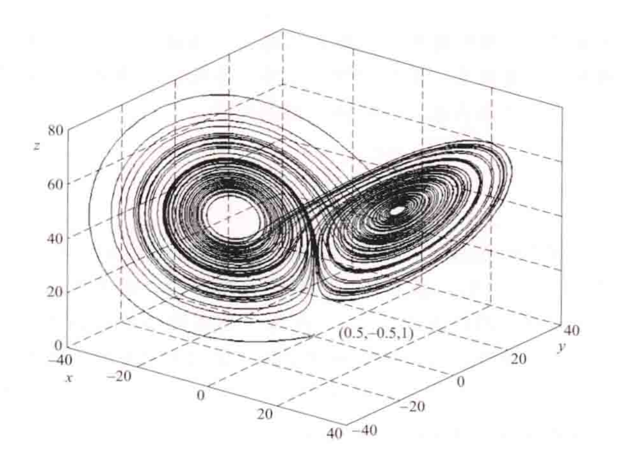


图 3 洛伦兹方程三维空间混沌轨线（汪芙平 提供）

最大李雅普诺夫指数 直流或交流激励下非时变电路的统计特征量，能用于判断电路是否出现混沌运动。将电路状态方程写成 n 维自治方程形式

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}),\ \boldsymbol{f}:R^n\rightarrow R^n$$

可以得到该方程对应的 n 维变分方程

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t}=D\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{u}$$

其中 $D\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})=\partial \boldsymbol{f}/\partial \boldsymbol{x}$ 是向量函数 $\boldsymbol{f}$ 的雅可比矩阵。变分方程的解除了与自身的初始状态 $\boldsymbol{u}_0$ 有关，还取决于自治方程的初值 $\boldsymbol{x}_0$，可记为 $\boldsymbol{u}(t;\ \boldsymbol{x}_0)$。对电路自治方程和变分方程的几乎所有的初始状态 $\boldsymbol{x}_0$ 和 $\boldsymbol{u}_0$，可以得到一个相同的极限值

$$\lambda=\overline{\lim_{t\to\infty}}\frac{1}{t}\ln\frac{\|\boldsymbol{u}(t;\boldsymbol{x}_0)\|}{\|\boldsymbol{u}_0\|}$$

式中 $\overline{\lim}$ 表示求上极限，该极限值称为系统的最大李雅普诺夫指数。最大李雅普诺夫指数表征了自治系统两个相邻解以指数方式分离的速率。若 $\lambda>0$，则可断定 $\boldsymbol{x}(t)$ 是混沌解，电路中出现了混沌；若 $\lambda<0$，则电路将出现直流稳态解；若 $\lambda=0$，则电路稳态解为周期解或拟周期解。

hundun xitong

混沌系统

（chaos systems） 具有混沌特性的确定性非线性系统。混沌系统具有以下特点：①不可长期预测；②拓扑可迁，即不能分解成两个相关的子系统；③含有规律性成分。有界系统是否出现混沌的判据是其相应的最大李雅普诺夫指数是否大于零。混沌控制、混沌同步、混沌反控制是消除混沌现象或利用混沌现象的有效方法。

混沌现象存在于物理、化学、生物、力学、工程技术等众多领域中，在电气工程学科中含有大量的非线性现象。首先，电力系统本身即是一个复杂的强非线性、强耦合系统，其中的非线性现象和系统的稳定性有着密切的联系。其次，传统的电机控制领域中也存在混沌现象，如永磁同步电机。同时，一些电力电子系统中也具有混沌现象，比如DC/DC变换电路；在高电压与绝缘技术中经常会遇到的铁磁谐振中的混沌现象。

永磁同步电机在制动过程中，对 q 轴施加控制电压 u，其无量纲的形式系统可以描述为

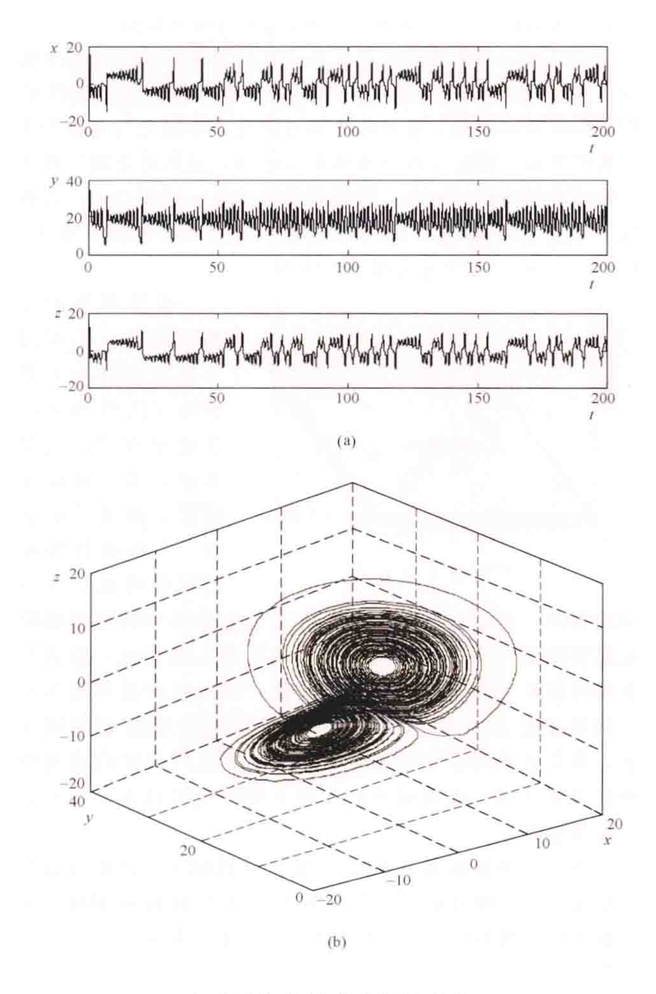
$$\begin{cases}\dot{x}_1=-x_1-x_2x_3+\rho x_3+u\\ \dot{x}_2=-x_2+x_1x_3\\ \dot{x}_3=\sigma(x_1-x_3)\end{cases}$$

式中 x_1 是定子电流 i 的 d 轴分量 i_d，x_2 是定子电流的 q 轴分量 i_q，x_3 是定子旋转磁场的转速 ω，ρ 和 σ 为参数。

图（a）是三个分量的时域响应，其中的 x、y、z 分别代表 x_1、x_2、x_3，图（b）是三个分量组成相空间的相图，这个相图刚好是个混沌吸引子。

最大李雅普诺夫指数 见混沌。

混沌控制 混沌控制指将混沌系统控制到目标平衡点上，从而消除混沌系统对主系统的影响。1990年，马里兰大



永磁同步电机中的混沌现象

(a) 时域响应；(b) 三维吸引子

学的物理学家 Ott、Grebogi 以及 Yorke 三人首先提出了用微小信号控制混沌系统参数从而实现混沌控制的概念，此即 OGY 方法。

混沌同步　当两个或多个耗散混沌系统耦合时会出现混沌同步的现象。1990 年，美国海军实验室的 Pecora 和 Carroll 提出了一种称为驱动-响应混沌同步的方法，并在电路上进行了模拟实验。从此，大量学者在混沌同步方面取得了丰硕的成果，混沌同步的研究迅速发展，相应地在理论上提出了多种方法，包括自适应方法（见适应控制系统）、观测器同步法（见现代控制理论）、滑模变结构方法（见滑模控制）、反馈控制方法等，这些方法在实际中成功地应用于保密通信和激光系统的同步等。

混沌反控制　混沌反控制是使一个非混沌系统出现混沌或者增强一个已有的混沌系统的混沌行为。

参考书目

罗晓曙．混沌控制、同步的理论与方法及其应用．桂林：广西师范大学出版社，2007.

hunza xitong

混杂系统

（hybrid systems）　在同一系统中包含连续动态和离散动态，并且两者之间相互影响、相互作用的一类复杂系统（见复杂系统）。混杂系统的研究源于工程实际的需要，如电力调度系统、交通管理系统、制造系统和流程工业系统等。混杂系统的概念起源于 20 世纪 60 年代，目前混杂系统理论及其在工程实际中的应用是控制科学的研究重点。

特征　主要包括复杂性、混杂性、交互性、实时性和模块性。①复杂性。结构复杂性、动态行为复杂性和算法的组合复杂性。②混杂性。结构混杂性、行为混杂性和信息混杂性。③交互性。各模块子系统存在着复杂的交互。④实时性。混杂系统中的时间是可度量的，系统的动态行为不仅与离散事件的顺序结构有关，也与事件间的时间结构紧密相关。⑤模块性。系统具有很强的层次性和分布式特性。

分类　混杂系统有不同的分类方法，分类依据分别是按有无外部输入、系统结构和行为、模型形式、变量功能以及变量耦合状况分类。

（1）按有无外部输入，分为自治和非自治混杂系统。如果混杂系统无外部输入，称为自治混杂系统；否则称为非自治混杂系统。

（2）按系统结构和行为，分为混杂控制系统和混杂状态系统。从系统结构出发，强调控制结构的混合，称为混杂控制系统；从系统行为出发，强调系统连续状态和离散状态的交替变化，称为混杂状态系统。

（3）按模型形式分类，根据实际混杂系统中的连续变量、离散变量及它们之间的相互作用，可分为切换型、集中控制型、递阶型、仿真语言型、混合自动机型、混合 Petri 网型等。

（4）按变量功能分类，按离散变量和连续变量在系统中的功能，分为组合型和交互型混杂系统。

（5）按变量耦合状况分类，依据混杂系统中“离散”和“连续”部分的耦合程度和方式，分为层次模型、关系模型和统一模型，是国内外主要的分类方法。①层次模型。该类系统的连续过程和离散事件过程大体可以分开，通过一个接口进行耦合。②关系模型。混杂系统的两种运动模式交互作用，控制器同时处理并发出符号量和连续量两种信息。③统一模型。假定系统的连续部分的状态空间由若干流形组成，系统在这些流形上的运动是连续的；离散部分表现为自主或受控的开关或跳跃，决定系统状态在不同流形上的切换。

主要研究内容　包括建模、验证理论与技术、分解/合成理论、性能分析以及控制与综合等。

（1）建模：对连续变量、离散变量及两者相互作用的描述。连续变量通常采用微分方程或差分方程的方式表示；离散事件一般用逻辑变量的演化规律表示；相互作用则用接口或关系方法表述。

（2）验证理论与技术：用形式化的方法和工具解决混杂系统设计的正确性问题。

（3）分解/合成理论：由于混杂系统的状态和行为的复杂性，建模和分析过程均可能涉及简化和合成的问题。

（4）性能分析：混杂系统的稳定性、鲁棒性等问题的分析。其中稳定性分析主要借助于各类扩展的李雅普诺夫稳定性理论。

（5）控制与综合：寻求混杂控制系统的恰当的框架结构，进行混杂控制器的性能指标分解、协调设计等。

huomen

或门

（OR gate）　实现或逻辑关系的门电路。它是一种常用的逻辑门。

或逻辑的真值表

A	B	L
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

若决定某一件事的条件中只要有一个成立，这件事就发生，否则就不发生，这样的逻辑关系称为“或逻辑”。

图1中只要开关S1或S2闭合，灯HW就亮。若以$A=1$、$B=1$分别表示开关S1、S2闭合，$A=0$、$B=0$分别表示开关S1、S2断开，$L=1$表示灯亮，$L=0$表示灯灭，则可得或逻辑的真值表（见逻辑函数）如表所示。或逻辑的表达式为$L=A+B$。读作L等于A或B。或逻辑门的输入变量可扩展到2个以上。

由二极管组成的或门电路及其图形符号如图2所示。

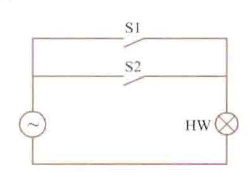


图1 或逻辑电路

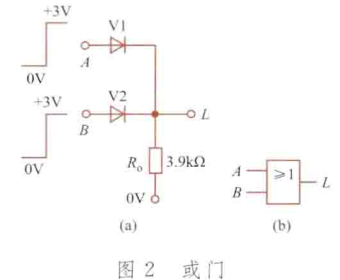


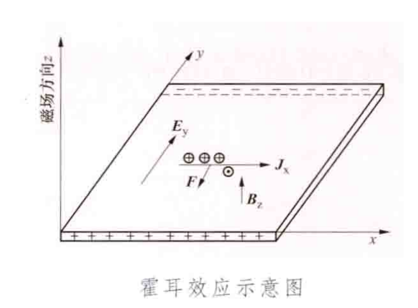
图2 或门

（a）电路；（b）图形符号

Huoer qijian

霍耳器件 （Hall element） 利用霍耳效应制成的固态电子器件。美国物理学家E. H. 霍耳（E. H. Hall）于1879年发现，当通以电流的物体置于与电流通过方向垂直的磁场中时，在垂直于电流和磁场两方向的物体两侧之间将产生一横向电场（见图）。其电场强度E_y与电流密度J_x及磁通密度B_z成正比，可写成$\boldsymbol{E}_y=-R_H\boldsymbol{J}_x\boldsymbol{B}_z$，式中$R_H$称为霍耳系数。

霍耳效应的本质是由于载流子在磁场中运动时受到电磁力$\boldsymbol{F}$的作用而偏移引起横向电流，导致导体边缘上电荷的积累形成横向电场，直到此电场对载流子作用力与电磁力$\boldsymbol{F}$平衡时形成了稳定电荷分布和霍耳电场。显然此电场与载流子所带电荷的符号有关，若载流子带正电，则$R_H>0$；若载流子带负电，则$R_H<0$。而且R_H与载流子的浓度n有关，$R_H=1/(qn)$，式中q为电子的电荷。



霍耳效应示意图

霍耳器件的主要用途有：①可用来判定材料中主要载流子的性质是电子还是空穴，以及判定在单一载流子情况下载流子的浓度。②在材料特性已知的情况下可以制成器件，测定磁场强度。③由于在电磁铁中的窄缝磁隙磁通密度B与电磁铁线圈中通入的电流I_B成正比，故霍耳电场强度$\boldsymbol{E}_y$与$\boldsymbol{J}_x$、$\boldsymbol{I}_B$的乘积成比例，因此利用霍耳器件可以制成乘法器。④在保持霍耳器件控制电流恒定的情况下，霍耳电场的强度与被测电流流过导线所产生的磁场的强度成正比例，该磁场强度反映了被测电流强度，可制成电流传感器。

由于半导体的霍耳系数R_H要比导体的大，故霍耳器件多用锗、硅、砷化镓、锑化铟等N型半导体材料制成。霍耳器件的外观不仅可做成简单的矩形，也可做成十字形、方形等。



Java yuyan

Java 语言 （Java） 见程序设计语言。

JK chufaqi

JK 触发器 （JK flip-flop） 在时钟脉冲有效作用下，输出新状态取决于 J、K 两个信号输入端状态的触发器。它广泛用于时序逻辑电路中，控制比较方便，但接线比较复杂。

JK 触发器的图形符号如图 1 所示，其中 J、K 是信号输入端，C1 为时钟信号输入端，输出为两个互补信号，稳态时的逻辑状态相反，一般用 Q 和 $\overline{Q}$ 表示。

JK 触发器的逻辑功能如表所示。表中用 Q^n 表示触发器的现态，用 Q^{n+1} 表示触发器的次态。由表可见，若 $J=0$、$K=0$，则时钟信号到达后触发器的状态不变（$Q^{n+1}=Q^n$）；若 $J=1$、$K=0$，则时钟信号到来后 $Q^{n+1}=1$；若 $J=0$、$K=1$，则时钟信号到达后 $Q^{n+1}=0$；若 $J=K=1$，则时钟信号到达后触发器的次态与原来状态相反（$Q^{n+1}=\overline{Q^n}$）。

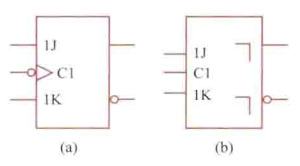


图 1 JK 触发器的图形符号

(a) 边沿触发 JK 触发器；(b) 主从 JK 触发器

JK 触发器的电路结构型式有许多种。在双极型集成电路中，常见的一种 JK 触发器电路结构如图 2 所示。这是一种边沿触发型结构，即触发器的次态只取决于 CP 下降沿到达时刻 J、K 的状态，而与其他时间 J、K 的状态无关。只要图中门 G3、G4 的传输延迟时间大于由门 G1、G2 组成的基本 RS 触发器的翻转时间，就能实现表中规定的逻辑功能。

JK 触发器功能表

J	K	Q^n	Q^{n+1}
0	0	0	0
0	0	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

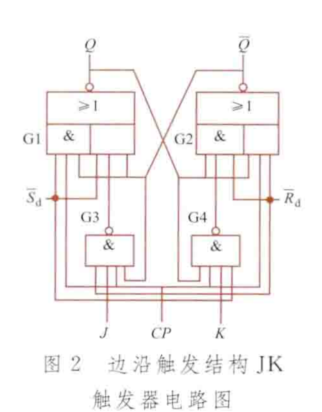


图 2 边沿触发结构 JK 触发器电路图

有时 JK 触发器也采用图 3 所示的主从结构。此电路由主、从两个时钟 RS 触发器组成，它们的时钟信号相位相反。当 $CP=1$ 时主触发器接受输入信号 J、K，从触发器保持状态不变；当 $CP=0$ 以后主触发器保持状态不变，从触发器按照主触发器的状态翻转。

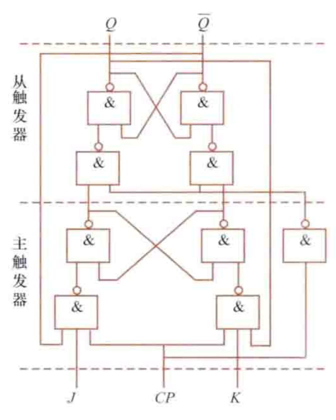


图 3 主从结构 JK 触发器电路图

jichuan shiyan

击穿试验 （breakdown test） 固体、液体或气体绝缘材料试样在电场作用下发生破坏性放电的试验。有工频击穿试验、直流击穿试验和冲击击穿试验。试验目的在于测量试样的击穿电压 U_b，并根据试样的平均厚度 d 求出其击穿电场强度 E_b，它是绝缘材料的重要性能指标（见电气绝缘性能）。通过击穿试验可了解受试绝缘材料在所承受的电场下维持绝缘性能的极限能力，以作为设计绝缘结构、考核绝缘裕度和选用绝缘材料的参考。

击穿电场强度测量原理 测量试样的击穿电压 U_b 与试样击穿点的厚度或平均厚度 d，用下式求取试样的击穿电场强度或平均击穿电场强度 E_b。

$$E_b=U_b/d$$

（1）击穿电压测量线路：图 1 示出工频击穿试验线路图。图 2、图 3 分别示出直流与冲击击穿试验线路原理图，与工频击穿试验装置一样，直流、冲击击穿试验装置也应具有调压器、控制线路和防护安全装置。要求较高的试验电压时，直流可用倍压线路（见直流高电压发生器），冲击可用多级冲击电压发生器（见冲击电压发生器）。试验前应调节冲击电压波形为 1.2/50μs 标准波。

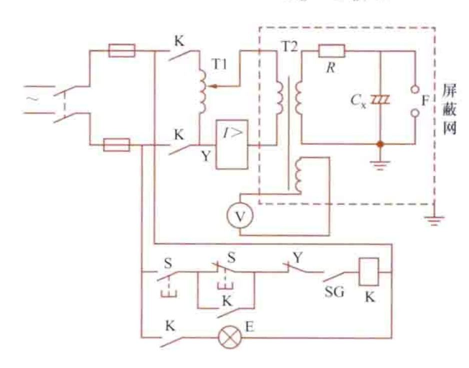


图 1 工频击穿试验线路图

T1—调压器；T2—试验变压器；R—保护电阻；C_x—试样；F—测量球隙；E—指示灯；S—按钮；Y—过载释放器；K—继电器线圈；SG—门开关

（2）升压方式：有连续升压、慢速连续升压与逐级升压几种方式。工频与直流击穿试

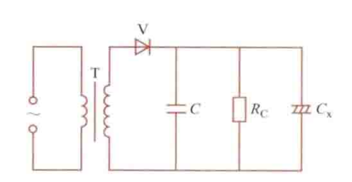


图 2 直流击穿试验线路原理图

T—高压试验变压器；V—整流元件；C—滤波电容器；R_C—泄漏电阻；C_x—试样

验，二者都可采用，冲击击穿试验采用后者。

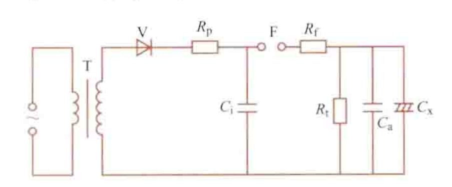


图 3　冲击击穿试验线路原理图

T—高压试验变压器；V—整流元件；R_p—限流电阻；C_1—主电容；F—球隙；R_f—波前电阻；C_a—负载电容；R_t—放电电阻；C_x—试样

（3）电压测量：可用静电电压表、测量球隙直接跨接于试样两端测量工频与直流击穿电压。工频击穿电压还可用电压互感器或变压器内的测量线圈测量。冲击击穿电压采用球隙50%放电法或带有分压器的示波器测量。

试样与电极　检查或验收试验用平板或管作试样。研究试验用有球形凹坑的型材作试样。平板试样用圆柱形或球形电极，管或型材用粘贴金属箔或喷涂金属作电极。

测试技术

（1）媒质的选择：一般在空气中进行试验。如发生表面飞弧，可在变压器油或六氟化硫中试验。但不同媒质中的试验结果不能相比较。

（2）击穿的判断：一般用电压突然下降或过电流继电器跳闸来判断。用试样产生小孔、开裂等击穿通道进行判断更为可靠。

（3）安全措施：击穿装置应有屏蔽网、门开关和信号灯，接地必须可靠。试验完毕，必须用接地棒对高压部位放电。换接试样时，应把接地棒挂在连接试样的高压端。

（4）试验结果的分析：由于试样的不均匀性及电极、媒质的影响，固体电介质的击穿强度试验结果存在一定分散性，对试验结果通常采用统计方法加以分析。

jixieshi zhishi dianbiao celiang jigou

机械式指示电表测量机构

（measuring mechanisms of electromechanical type indicating meters）　利用电磁或静电效应产生力矩，驱使可动部分运动，带动指针或光点在刻度盘上偏转，以反映被测对象量值大小的装置。主要包括磁电系、电磁系、电动系、静电系等测量机构。

测量机构包括可动部分和静止部分。驱使可动部分偏转的力矩称为转动力矩 M。为分辨转动力矩的大小，需要一个随偏转角 α 改变而变化的反抗力矩 M_α。反抗力矩一般由游丝或张丝提供。可动部分及其所带动的指针，停留在上述两力矩平衡（即 $M=M_\alpha$）的位置。

磁电系测量机构　处在气隙磁场中的可动线圈通过电流时，将产生转动力矩，使线圈带动指针或小镜偏转。电流经游丝或张丝引入线圈，磁场由永久磁铁提供（见表）。测量的基本量是直流电流，最小达微安级，刻度均匀，主要用于制成直流电流表和直流电压表。

电磁系测量机构　表中所示为推斥式结构。电流 I（直流或交流）通过线圈使静铁和动铁同时磁化，产生以推斥力为主的转动力矩，驱使动铁带动指针偏转（见表）。测量的基本量是电流。改变动铁、静铁形状，可控制刻度的分布。因无电流通过游丝，故过载能力强，主要用于制成交流电压表和交流电流表；可测的最小电流为几十毫安。

各系机械式指示电表测量机构

电表系别	原理结构图及符号	量测基本量	转动力矩 M	反抗力矩 M_α	主要用途
磁电系	指针　永久磁铁　游丝　I　动圈　气隙	直流电流	$M=KI$，其中 I 为通过动圈的电流；K 为与动圈匝数、尺寸及气隙磁通密度有关的系数	由游丝或张丝提供，$M_\alpha=K_\alpha\alpha$，其中 α 为指针偏转角；K_α 为游丝常数	制成直流电流表、电压表
电磁系	指针　游丝　静铁　线圈　I　动铁　轴	直流或交流有效值电流	$M=KI^2$，其中 I 为通过线圈的电流；K 为与静、动铁形状及相互位置有关的系数	由游丝或张丝提供，$M_\alpha=K_\alpha\alpha$，其中 α 为指针偏转角；K_α 为游丝常数	制成交流电流表、电压表
电动系	指针　静圈　静圈　动圈　游丝　I_2　I_1	两直流电流的乘积或两交流电流及其相角差余弦三者的乘积	$M=KI_1I_2\cos\varphi$，其中 I_1 为通过动圈的电流；I_2 为通过静圈的电流；φ 为 I_1、I_2 的相角差；K 为与线圈匝数、尺寸及相对位置有关的系数	由游丝或张丝提供，$M\alpha=K_\alpha\alpha$，其中 α 为指针偏转角；$K\alpha$ 为游丝常数	制成直流或交流电流表、电压表、功率表
静电系	U　固定电极　反射镜　可动电极　张丝(垂直纸面)	直流或交流电压	$M=KU^2$，其中 U 为加在两电极之间的电压；K 为与电极形状、结构有关的系数	由游丝或张丝提供，$M_\alpha=K_\alpha\alpha$，其中 α 为指针偏转角；K_α 为游丝常数	制成直流或交流电压表

电动系测量机构　电流通过静圈产生磁场，使处在此磁场中通有电流的动圈受到转动力矩作用，从而带动指针偏转（见表）。测量的基本量是动圈电流 I_1 与静圈电流 I_2 的乘积；对于交流，还要乘以这两个电流相角差的余弦。主要用于制成直流或交流电流表、电压表和功率表；可测的最小电流为几十毫安。磁路由铁磁材料组成的，称作铁磁电动系测量机构。

静电系测量机构　加在可动电极与固定电极之间的电压 U，使可动电极受到力的作用而发生偏转（见表）。测量的基本量是直流电压或交流电压，主要用于测量电压。因电极结构的不同，所测电压最高达几百千伏，最低几十伏。

jifenqi

积分器

积分器　(integrator)　把集成运算放大器接成能实现输出电压与输入电压对时间的积分成正比的放大电路。它广泛用于波形变换、延时等环节中，是信号处理系统中的重要单元电路。

工作原理　图 1 为基本的积分单元电路。设运算放大器（简称运放）N 为理想元件，因其同相输入端接地，故反相输入端为“虚地”点，运放为理想元件，故 b1 与 b2 间为“虚断”（见加法电路）。按“虚断”的概念，流过 R 的电流等于流过 C 的电流，即 $i_1=i_C$；按“虚地”的概念，得 $i_1=u_I/R=i_C$。故输出电压即电容 C 两端的电压为

$$u_O=-\frac{1}{C}\int_0^t i_C\mathrm{d}t+u_C\Big|_{t=0}\tag{1}$$

式中 $u_C\Big|_{t=0}$ 为 $t=0$ 时电容 C 两端的起始电压。若 $u_C\Big|_{t=0}$ 为零，则式 (1) 变为

$$u_O=-\frac{1}{RC}\int_0^t u_I\mathrm{d}t\tag{2}$$

可见输出电压与输入电压对时间的积分成正比关系，但冠以负号。式 (2) 中 RC 称为积分时间常数 τ；$1/RC$ 又称为积分增益。

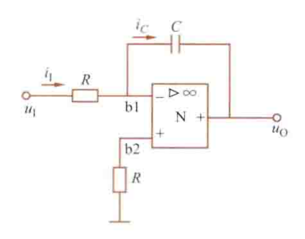


图 1　基本积分放大电路

应用　积分器常用在延时或波形变换电路中。

(1) 用作延时。设图 1 中 $R=10\text{k}\Omega$，$C=0.1\mu\text{F}$；运算放大器 N 的输出端接一个电压继电器，它的动作电压为 5V。若在 $t=0$ 时刻，u_I 突然由零跃为 −1V，则电压继电器启动的时刻可求得如下：将 $u_I=-1\text{V}$，$u_O=5\text{V}$ 代入式 (2)，得 $t=5\text{ms}$，即电压继电器在阶跃电压发生突变后延迟 5ms 启动。u_I 和 u_O 的波形如图 2 所示。

(2) 用作波形变换。若 u_I 为方波如图 3 (a) 所示，且 R、C 值同上，则输出电压 u_O 的波形如图 3 (b) 所示。可见，积分器将输入方波信号变换成了三角波。

频率特性　图 1 所示电路的电压放大倍数为：$\frac{U_O(s)}{U_I(s)}=-\frac{1/sC}{R}=-\frac{1}{sCR}$，式中 s 为运算子。其频率特性（见放大电路）为

$$\frac{U_O}{U_I}=-\frac{1}{\mathrm{j}\omega CR}$$

其幅频特性为

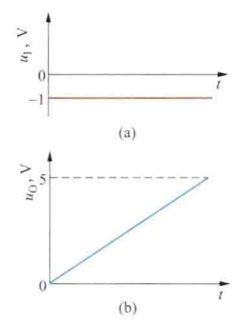


图 2　积分器输入阶跃电压时的波形图
(a) 输入阶跃电压 u_I；
(b) 输出电压 u_O

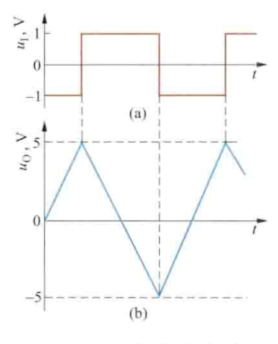


图 3　积分器将方波变换为三角波
(a) 输入方波 u_I；
(b) 输出三角波 u_O

$$\left|\frac{U_O}{U_I}\right|=\left|\frac{1}{2\pi fCR}\right|\tag{3}$$

按式 (3) 可画出其幅频特性的伯德图，如图 4 所示。横坐标的标尺为频率 f 的常用对数，纵坐标的标尺为电压放大倍数 $\left|\frac{U_O}{U_I}\right|$ 的分贝 (dB)，又称电压增益。由式 (3) 可知：当 $f=\frac{1}{2\pi CR}$ 时，电压放大倍数 $\left|\frac{U_O}{U_I}\right|=1$；也就是说，当 $f=\frac{1}{2\pi CR}$ 时，电压增益 $20\lg\left|\frac{U_O}{U_I}\right|=0\text{dB}$。由式 (3) 还可看到：当 $f\to0$ 时，电压放大倍数 $\left|\frac{U_O}{U_I}\right|\to\infty$；也就是说，当 $f\to0$ 时，电压增益 $20\lg\left|\frac{U_O}{U_I}\right|\to\infty\text{dB}$。

式 (2) 和式 (3) 是在假设运放和所有元件均为理想条件下得到的。实际上，理想元件是不存在的。例如，电容 C 两端的绝缘电阻不可能为无穷大，这样，就有一个很大的电阻 R_1 和电容 C 并联，如图 5 所示。于是反馈支路的阻抗为 $Z=\frac{1}{sC}/\!/R_1$，式中 $/\!/$ 为阻抗并联符号，电压放大倍数为

图 4　图 1 电路的幅频特性伯德图

$$\frac{U_O(s)}{U_I(s)}=-\frac{Z}{R}=-\frac{R_1/R}{1+sCR_1}\tag{4}$$

令 $s=\mathrm{j}2\pi f$，则对应的频率特性为

$$\frac{U_O}{U_I}=-\frac{R_1/R}{1+\mathrm{j}2\pi fCR_1}\tag{5}$$

由式 (5) 可见：当 $f=0$ 时，即直流状态时，其电压放大倍数为 $\frac{U_O}{U_I}=-\frac{R_1}{R}$，即存在一定的比例放大作用，其电压增益为 $20\lg\frac{R_1}{R}$。式 (5) 可看作由两个环节组成，即

图 5　电容两端存在有限绝缘电阻 R_1 时的积分放大电路

$$\frac{U_O}{U_I}=-\left(\frac{R_1}{R}\right)\left(\frac{1}{1+\mathrm{j}2\pi fCR_1}\right)$$

电压增益为

$$20\lg\left|\frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_I}\right| = 20\lg\frac{R_1}{R} + 20\lg\left|\frac{1}{1+j2\pi fCR_1}\right| \qquad (6)$$

式（6）右边第二项代表低通滤波器传递函数的幅频特性。当 $f=0$ 时，其电压增益 $20\lg\left|\frac{1}{1+j2\pi fCR_1}\right|=0\text{dB}$；当 $f=\frac{1}{2\pi CR_1}$ 时，其电压增益 $20\lg\left|\frac{1}{1+j2\pi fCR_1}\right|=20\lg\frac{1}{\sqrt{2}}=-3\text{dB}$，$f=\frac{1}{2\pi CR_1}=f_h$ 又称低通滤波器的上限截止频率。由式（6）还可得：

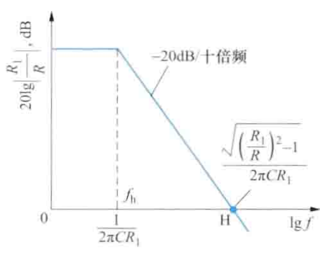


图6　图5电路的幅频特性伯德图

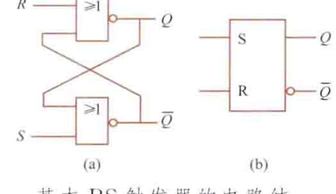
当电压增益 $20\lg\left|\frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_I}\right|=0\text{ dB}$ 时，可得 $\frac{R_1}{R}=\sqrt{1+(2\pi fCR_1)^2}$，即 $f=\frac{\sqrt{\left(\frac{R_1}{R}\right)^2-1}}{2\pi CR_1}$，如图6中的H点所示。故式（6）所示的幅频特性如图6所示。

jiben RS chufaqi

基本RS触发器

（basic RS flip-flop）　由门电路加适当反馈线构成的具有记忆功能的逻辑电路，它有两个稳定状态、无需时钟脉冲的配合就能对输入信号进行接收、输出和保持。它是电路结构最简单的触发器，是形成功能更完善的触发器的基础。

基本RS触发器通常用两个或非门（也可以用与非门、与或非门等）组成，如图（a）所示。图（b）是它的图形符号。图中的 S 为置1输入，R 为置0输入。Q 和 $\overline{Q}$ 是两个互补输出端，它们在稳态下的逻辑状态是相反的。习惯上定义 $Q=1$，$\overline{Q}=0$ 为触发器的1状态，$Q=0$，$\overline{Q}=1$ 为触发器的0状态。



基本RS触发器的电路结构和图形符号

（a）电路结构；（b）图形符号

电路输出状态与输入信号之间逻辑关系见触发器功能表。表中以 Q^n 表示触发器原来的状态（亦称现态），以 Q^{n+1} 表示输入信号作用后触发器的新状态（亦称次态）。该表说明，当 $S=R=0$ 时，触发器保持原状态不变；当 $S=1$、$R=0$ 时，不论现态如何，触发器次态均被置成1状态；当 $S=0$、$R=1$，不论现态如何，触发器次态均被置成0状态；当 $S=R=1$ 时，在输入信号同时消失后触发器的状态无法确定，所以应避免出现 $S=R=1$ 的输入情况，即要求遵守 $R\cdot S=0$ 的约束条件。

基本RS触发器功能表

S	R	Q^n	Q^{n+1}	S	R	Q^n	Q^{n+1}
0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	1	1	0
1	0	0	1	1	1	0	不定
1	0	1	1	1	1	1	不定

jiben geji juzhen

基本割集矩阵

（fundamental cut-set matrix）　见网络图论。

jiben huilu juzhen

基本回路矩阵

（fundamental loop matrix）　见网络图论。

jibo dianliu

基波电流

（fundamental current）　将非正弦周期性电流函数按傅里叶级数展开时，序数为1的分量，即和原周期电流同频率的正弦电流分量。（见非正弦周期电流电路）

Ji'erhuofu dinglü

基尔霍夫定律

（Kirchhoff's Laws）　表明集总参数电路中有关支路电流之间和有关支路电压之间约束关系的定律。1845年由德国人G. R. 基尔霍夫（G. R. Kirchhoff）（见图1）提出，包括基尔霍夫第一定律和基尔霍夫第二定律。

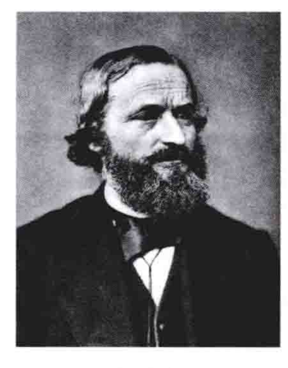


图1　基尔霍夫（Gustav Robert Kirchhoff，1824—1887）

基尔霍夫第一定律　又称基尔霍夫电流定律（KCL），其内容为：对于任一集总参数电路（见电路）中的任一节点或割集（见网络图论），在任一时刻，流入该节点或割集的所有支路电流的代数和等于零。

对任一节点或割集，KCL可表述为

$$\sum i(t)=0$$

在图2所示电路中，对节点a，如以离开节点电流为正，则有

$$-i_1+i_2+i_5=0$$

对割集K，如以离开图中虚线所示封闭面的电流为正，则有

$$-i_5-i_2+i_3-i_6=0$$

基尔霍夫第二定律　又称基尔霍夫电压定律（KVL），其内容为：对任一集总参数电路中的任一网孔或回路，在任一时刻，沿着该网孔或该回路的所有支路电压的代数和等于零。

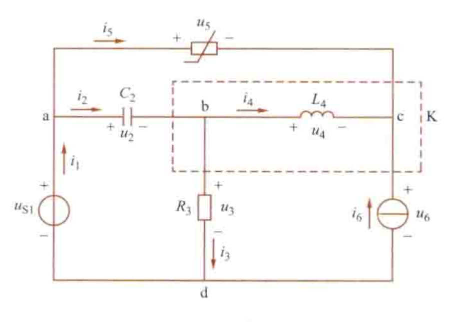


图2　电路图

对任一网孔或回路，KVL可表述为

$$\sum u(t)=0$$

在图示电路中，沿网孔acba，则有

$$u_5-u_4-u_2=0$$

沿回路acbda，则有

$$u_5-u_4+u_3-u_{S1}=0$$

基尔霍夫定律与元件的性质无关，它们表明电路中各支路电流间的约束关系和各支路电压间的约束关系。基尔霍夫定律也蕴含电路的功率守恒（见特勒根定理）。

对在电力工程中大量遇到的正弦电流电路（见电路）来说，如果支路电流用相量表示，则基尔霍夫电流定律可表示为

$$\sum_{k=1}^{n} \dot{I}_k = 0$$

式中 $\dot{I}_k$ 为汇集于某节点或某割集的第 k 条支路电流的有效值相量；n 为汇集于该节点或割集的支路的总数。如果支路电压用相量表示，则基尔霍夫电压定律可表示为

$$\sum_{k=1}^{n} \dot{U}_k = 0$$

式中 $\dot{U}_k$ 为网孔或回路中第 k 条支路电压的有效值相量；n 为该网孔或回路中支路的总数。

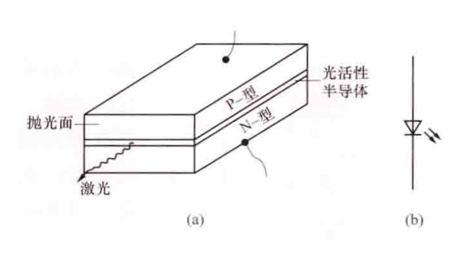
jibian gonglü

畸变功率 (distortion power) 周期非正弦电流、电压波形情况下为满足功率关系式而引入的附加功率。将二端电路的电流和电压的周期非正弦波形分别分解成傅里叶级数，而且将直流分量和基波分别当作零次和一次谐波看待。设 U_n 和 I_n 分别是第 n 次谐波电压和电流的有效值，φ_n 是第 n 次谐波电流滞后于第 n 次谐波电压的相位差角，并规定 $\varphi_0=0$，则有功功率 $P=\sum\limits_{n=0,1,2,\cdots} U_n I_n \cos\varphi_n$；无功功率 $Q=\sum\limits_{n=0,1,2,\cdots} U_n I_n \sin\varphi_n$；视在功率 $S=\sqrt{\sum\limits_{n=0,1,2,\cdots} U_n^2} \times \sqrt{\sum\limits_{n=0,1,2,\cdots} I_n^2}$。由于 $S^2 \neq P^2+Q^2$，于是引入畸变功率 D 使得满足 $S^2=P^2+Q^2+D^2$，则 $D=\sqrt{S^2-P^2-Q^2}$。

jiguang erjiguan

激光二极管 (laser diode) PN 结间安置一层光活性半导体，实现受激发射的光电半导体器件。激光二极管的物理结构和图形符号如图所示。器件端面经过抛光后具有部分反射功能，形成光谐振腔。在正向偏置的情况下，发光二极管（LED）发射出来的光与光谐振腔相互作用，从而进一步激励从结上发射出单波长的光，产生相干的单色信号，并可更有效地由光缆来传输。

激光二极管发射的主要是红外线。这与所用的半导体材料（如砷化镓等）的物理性质有关。激光二极管在小功率光电设备中得到广泛应用，如计算机上的光盘驱动器，激光打印机中的打印头等。



激光二极管的物理结构和图形符号

(a) 物理结构；(b) 图形符号

jili (dianlu)

激励（电路） [excitation (electric circuit)] 作用于某个系统的、其随时间的变化规律不依赖于系统结构和系统参数的物理量。在电路理论里，激励常指独立电压源的电压和独立电流源的电流。它们随时间变化的规律（如独立电压源的电压随时间作正弦变化）不依赖于电路中其他元件和元件间的连接方式。在自动控制理论里，系统的输入就是激励。

jili (qiti fangdian)

激励（气体放电） [excitation (gas discharge)] 原子或分子在接收外界能量后，从最低能量状态的基态跃迁到较高能量状态的激励态的过程。在原子或分子中，各种激励态所具有的能量只能是确定的分离的数值。被激励原子或分子所吸收的能量也具有分离的数值，称之为激励能或激励电位，单位用 eV（电子伏）或 V 表示。

激励是由入射的光子、电子、中性原子或分子、带电粒子与原子或分子之间的相互碰撞造成的。产生激励的碰撞可能性用激励截面来表示，单位为 m^2。

激励态是不稳定的，可在 10^{-8}s 后自发地转移到较低的能级上，并发射出具有相应能量差的光量子，其光谱范围可以从可见光到 X 射线。这个过程称为去激励。去激励的结果会产生光辐射，这对气体的电离和放电发展均有重要作用。某些原子具有寿命可达 $10^{-4}\sim10^{-2}$ s 的激励态，称为亚稳态。因亚稳态存在时间较长，它和电子等碰撞后，容易产生碰撞电离。

jidazhi yuanli

极大值原理 (maximum principle) 最优控制理论中用以确定使受控系统或运动过程的给定性能指标取极大值的最优控制主要方法之一。是最优控制方法中极小值原理的对偶方法，可确定工程领域中很大一类问题的最优控制规律。极大值原理源于分析力学中古典变分法的推广，在理论上也是最优控制理论形成和发展的基础。

极大值原理不仅可用于解决连续形式的受控系统的最优控制问题，而且还被推广于处理离散形式的受控系统的最优控制问题，同时它对求解分布参数系统的最优控制问题也很有效。（见极小值原理）

jidian

极点 (pole) 见传递函数。

jidian peizhi

极点配置 (pole assignment) 选用适当的反馈，使定常线性系统的闭环极点处于期望的位置。一个系统的性能和它的极点在复平面上的位置密切相关，因此极点配置问题在系统设计中很重要。在经典控制理论和现代控制理论中，反馈都是系统设计的主要内容。经典控制理论对系统作输入输出描述，只能以输出量作反馈，并利用串联、并联补偿装置及调整开环增益使系统具有期望的闭环极点位置。现代控制理论用系统内部的状态变量来描述系统，除了可以用输出反馈作极点配置以外，还可以用效果更好的全状态反馈。

采用状态反馈使闭环极点配置在任意位置上的充要条件是：受控对象可控。

采用输出反馈使闭环极点配置在任意位置上的充要条件是：受控对象可观测。

jixianhuan

极限环 (limit cycle) 见相平面法。

jixiaozhi yuanli

极小值原理 (minimum principle) 控制向量 $\boldsymbol{u}(t)$ 受限制的情况下，使哈密顿函数取极小，求解最优控制问题的原理和方法，又称极大值原理。（见极大值原理）

在用古典变分法求解最优控制问题时，假定控制向量 $\boldsymbol{u}(t)$ 不受任何限制，即容许控制集合可以看成整个 p 维控制空间，此时控制变分 $\delta\boldsymbol{u}$ 可以任取。同时还严格要求哈密顿函数 H 对 $\boldsymbol{u}$ 连续可微。在这种情况下，应用变分法求解最优控制问题是有效的。但是，实际工程问题中，控制变量往往受到一定限制，容许控制集合是一个 p 维有界闭集。此时，控制变分 $\delta\boldsymbol{u}$ 在容许集合边界上就不能任意选取，最优控制的必要条件 $\partial\boldsymbol{H}/\partial\boldsymbol{u}=0$ 就得不到满足。若最优控制解落在控制集的边界上（例如最短时间控制问题），一般便不满足 $\partial\boldsymbol{H}/\partial\boldsymbol{u}=0$，就不能再用古典变分法来求解最优控制问题。

极小值原理是在20世纪50年代由苏联学者庞特里雅金（Л. С. Понтрягин）提出的，它的结果与古典变分法极为近似。但它克服了古典变分法的局限性，适用范围扩大了。原先提出时，称为“极大值原理”，两者是一致的，因为一个函数的极小与其反号函数的极大是相同的。

连续系统的极小值原理　系统的状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}(t),t]$$

式中 $\boldsymbol{x}(t)$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}(t)$ 为 p 维控制向量。边界条件可以固定、自由或受轨线约束，控制向量 $\boldsymbol{u}(t)$ 属于 p 维有界闭集 U，即

$$\boldsymbol{u}(t)\in\boldsymbol{U}\subset R^p$$

性能指标为

$$J=h[\boldsymbol{x}(t_f),t_f]+\int_{t_0}^{t_f}g[\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}(t),t]\mathrm{d}t$$

则使性能指标 J 达到极小的最优控制 $\boldsymbol{u}^*(t)$ 及最优状态轨线 $\boldsymbol{x}^*(t)$ 必须满足以下条件：

（1）满足正则方程。

$$\dot{\boldsymbol{x}}^*(t)=\partial\boldsymbol{H}/\partial\boldsymbol{\lambda}|_*$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}^*(t)=-\partial\boldsymbol{H}/\partial\boldsymbol{x}|_*$$

式中 $\boldsymbol{H}$ 为哈密顿函数，$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},\boldsymbol{\lambda},t)=g(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t)+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t)$；$\boldsymbol{\lambda}$ 为共态向量。

（2）对应于最优控制时，哈密顿函数为极小值，即

$$\min_{u\in U}\boldsymbol{H}[\boldsymbol{x}^*(t),\boldsymbol{u}(t),\boldsymbol{\lambda}^*(t),t]=\boldsymbol{H}[\boldsymbol{x}^*(t),\boldsymbol{u}^*(t),\boldsymbol{\lambda}^*(t),t]$$

$$\boldsymbol{H}[\boldsymbol{x}^*(t),\boldsymbol{u}^*(t),\boldsymbol{\lambda}^*(t),t]$$

亦即

$$\leqslant\underset{u\in U}{\boldsymbol{H}}[\boldsymbol{x}^*(t),\boldsymbol{u}(t),\boldsymbol{\lambda}^*(t),t]$$

当 $\boldsymbol{u}(t)$ 不受限制时，则上式与 $\partial\boldsymbol{H}/\partial\boldsymbol{u}|_*=0$ 等效。

（3）根据不同的边界情况，$\boldsymbol{x}^*(t)$ 与 $\boldsymbol{u}^*(t)$ 满足相应的边界条件及横截条件，见变分法。

离散系统的极小值原理　系统的状态方程为

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{u}(k),k]\quad k=0,1,\cdots,N-1$$

式中 $\boldsymbol{x}(k)$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}(k)$ 为 p 维控制向量；k 为步数；N 为总步数。设初始状态 $\boldsymbol{x}(0)=\boldsymbol{x}_0$，终端状态 $\boldsymbol{x}(N)$ 自由。控制向量受限制，即

$$\boldsymbol{u}(k)\in\boldsymbol{U}\subset R^p$$

性能指标为

$$J=h[\boldsymbol{x}(N),N]+\sum_{k=0}^{N-1}g[\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{u}(k),k]$$

要求寻找最优控制序列 $\boldsymbol{u}^*(k)$，使性能指标 J 为极小。

作哈密顿函数

$$\boldsymbol{H}[\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{u}(k),\boldsymbol{\lambda}(k+1),k]=g[\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{u}(k),k]+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}(k+1)\boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}(k),\boldsymbol{u}(k),k]$$

使 J 达极小的最优控制必须满足以下条件：

（1）满足正则方程

$$\boldsymbol{x}^*(k+1)=\frac{\partial\boldsymbol{H}[\boldsymbol{x}^*(k),\boldsymbol{u}^*(k),\boldsymbol{\lambda}^*(k+1),k]}{\partial\boldsymbol{\lambda}(k+1)}=\boldsymbol{f}[\boldsymbol{x}^*(k),\boldsymbol{u}^*(k),k]$$

$$\boldsymbol{\lambda}^*(k)=\frac{\partial\boldsymbol{H}[\boldsymbol{x}^*(k),\boldsymbol{u}^*(k),\boldsymbol{\lambda}^*(k+1),k]}{\partial\boldsymbol{x}(k)}$$

（2）对应于最优控制时，哈密顿函数达极小值，即

$$\boldsymbol{H}[\boldsymbol{x}^*(k),\boldsymbol{u}^*(k),\boldsymbol{\lambda}^*(k+1),k]\leqslant\underset{u(k)\in U}{H}[\boldsymbol{x}^*(k),\boldsymbol{u}(k),\boldsymbol{\lambda}^*(k+1),k]$$

（3）$\boldsymbol{x}^*(0)$ 及 $\boldsymbol{\lambda}^*(N)$ 满足以下边界条件及横截条件

$$\boldsymbol{x}^*(0)=\boldsymbol{x}_0,\boldsymbol{\lambda}^*(N)=\frac{\partial h[x^*(N),N]}{\partial\boldsymbol{x}(N)}$$

对不同的边界情况，需选取相应的边界条件及横截条件，条件（1）、（2）不变。当控制向量不受限制时，则条件（2）可由下列控制方程求解

$$\frac{\partial\boldsymbol{H}[\boldsymbol{x}^*(k),\boldsymbol{u}^*(k),\boldsymbol{\lambda}^*(k+1),k]}{\partial\boldsymbol{u}(k)}=0$$

jicheng danwentai chufaqi

集成单稳态触发器 (integrated monostable multivibrator) 在外部触发信号作用下能产生一定宽度输出脉冲的一种单片集成触发器。集成单稳态触发器具有使用简便、输出脉冲调节范围宽等优点。通常在使用时只需外接一个电阻和一个电容即可。通过改变电阻、电容的大小，可以获得数十纳秒至数秒宽度的输出脉冲。

集成单稳态触发器在工作时只有一个稳定状态，仅在外部触发脉冲的作用下，才进入另一个暂稳态，经过一段时间以后，电路便自行返回稳态。暂稳态的持续时间（亦即输出脉冲的宽度）由外接电阻、电容的数值决定，与触发脉冲的宽度无关。

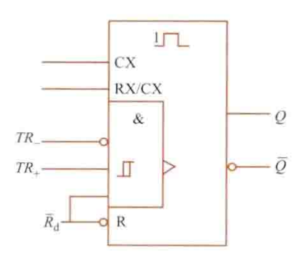


图1　集成单稳态触发器的图形符号

图1示出了单稳态触发器的图形符号，表中给出了它的功能。其中 Q、$\overline{Q}$ 是两个互补输出端，它们的相位始终相反。表中的×表示可以是1也可以是0。为了适应使用输入信号不同边沿触发的要求，设置了 TR_+、TR_- 两个触发输入信号。用输入信号的上升沿触发时由 TR_+ 输入，用输入信号的下降沿触发时由 TR_- 输入。CX 和 RX/CX 是外接电阻和电容的接线端。$\overline{R}_d$ 为复位信号，$\overline{R}_d$ 为低电平可以立即使电路从暂稳态返回稳态。

集成单稳态触发器的功能表

$\overline{R}_d$	TR_+	TR_-	Q	$\overline{Q}$	$\overline{R}_d$	TR_+	TR_-	Q	$\overline{Q}$
0	×	×	0	1	1	↑	0	⊓	⊔
×	0	×	0	1	1	1	↓	⊓	⊔
×	×	1	0	1					

集成单稳态触发器有“非重触发”和“可重触发”两种类型。它们的引出端设置以及外部连接方式没有区别，但工作特性上有些差异。在非重触发单稳态触发器中，电路一经触发而进入暂稳态以后，再加入的触发信号不起作用，必须等到电路返回稳态以后，才能再次触发，如图 2 所示。在可重触发单稳态触发器中，如果在电路处于暂稳态期间再加入触发信号，则暂稳态的持续时间将被延长，而且延长的时间等于每次单独触发时的暂稳态持续时间 T_W，如图 3 所示。

集成单稳态触发器的缺点是输出脉冲宽度的稳定性稍差，易受电源电压波动和环境温度变化的影响。

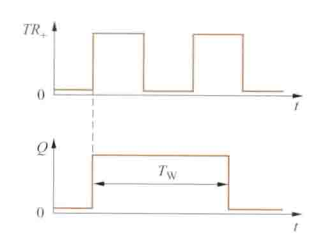


图 2　非重触发单稳态触发器的工作波形

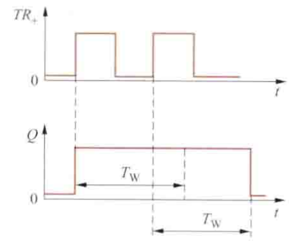


图 3　可重触发单稳态触发器的工作波形

jicheng dianlu

集成电路　(integrated circuit，IC)　采用一定的工艺，将一个电路所需的元器件及其连接导线全部制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上，然后封装成一个整体，即可实现某种功能的电子电路。它广泛应用于广播、电视、计算机、电子仪器、电力系统继电保护装置、测量设备和控制装置之中。

分类　集成电路应用广泛，门类繁多，分类方法也多种多样，常见分类方法的分类依据有：①处理信号的类型；②结构形式和材料；③所用晶体管结构、电路和工艺；④集成规模的大小；⑤应用性质；⑥设计风格。

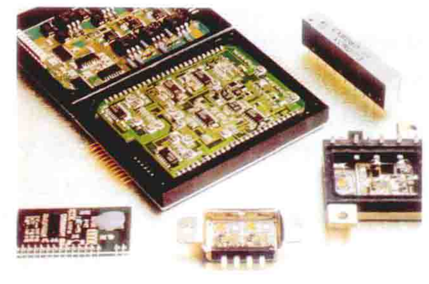
(1) 按处理信号的类型不同，可分为模拟集成电路、数字集成电路和数模混合集成电路。模拟集成电路是用来处理各种连续变化的模拟信号，如运算放大器、模拟滤波器等；数字集成电路是对各种数字信号进行运算和处理的电路，如集成逻辑电路、微处理器、存储器等；数模混合集成电路既包含模拟电路，又包含数字电路。随着芯片规模越来越大，电路越来越复杂，出现了片上系统（system on chip，SoC），使数模混合集成电路的应用发展备受关注。

(2) 按结构形式和材料不同，可分为半导体集成电路和膜集成电路。半导体集成电路主要指单片集成电路，是当前的主流技术。膜集成电路是由单片集成电路和分立元件、器件混合而成。采用薄膜技术混合的，称为薄膜电路；采用厚膜技术混合的，称为厚膜电路。

(3) 按所用晶体管结构、电路和工艺不同，可分为双极型集成电路、MOS 集成电路和 BiCMOS 集成电路。双极型集成电路的主要器件是双极型晶体管，如中小规模数字集成电路和许多模拟集成电路；MOS 集成电路的主要器件是 MOS 晶体管，有 NMOS 集成电路、PMOS 集成电路和 CMOS 集成电路三种，其中 CMOS 集成电路性能优越，应用最多；BiCMOS 集成电路芯片上同时包含双极型晶体管和 MOS 晶体管，它综合了双极型和 MOS 集成电路的优点，但其制造工艺比较复杂。

(4) 按集成规模的大小不同，可分为小规模集成电路（small scale integrated circuits，SSI），集成度 $<10^2$（所谓集成度是指单片集成电路上所能容纳的元件数目）；中规模集成电路（medium scale integrated circuits，MSI），集成度 $10^2\sim10^3$；大规模集成电路（large scale integrated circuits，LSI），集成度 $10^3\sim10^5$；超大规模集成电路（very large scale integrated circuits，VLSI），集成度 $10^5\sim10^7$；甚大规模集成电路（ultra large scale integrated circuits，ULSI），集成度 $10^7\sim10^9$；巨大规模集成电路（giga scale integrated circuits，GSI），集成度 $>10^9$。图示为大规模集成电路芯片。

(5) 按应用性质不同，可分为通用集成电路和专用集成电路（application specific integrated circuit，ASIC）。通用集成电路主要指各种标准逻辑电路、通用存储器和微处理器等。ASIC 指面向专门用途的集成电路，它往往是由用户参与设计出的具有特色、个性化的产品。ASIC 在批量生产时与通用集成电路相比具有体积更小、功耗更低、可靠性提高、性能提高、技术保密性增强、成本降低等优点。



大规模集成电路芯片

(6) 按设计风格不同，可分为全定制、半定制和可编程集成电路。全定制集成电路按规定的功能、性能要求，对电路的结构、布局、布线等均进行专门的最优化设计，以达到芯片的性能最佳。这样制作的集成电路称为全定制电路。半定制集成电路由生产厂家提供一定规格的功能块，如门阵列、标准单元等，按用户要求利用专门设计的软件进行必要的连线，从而设计出所需要的专用集成电路，称为半定制电路。可编程集成电路，由生产厂家提供已经封装好的芯片，芯片的功能由用户利用专门设计的工具软件“写入”其中，编程后的芯片便成为专用集成电路，如可编程逻辑器件。

发展简史　20 世纪 50 年代末美国开始研制微型组件，即将二极管、晶体管做成微型芝麻管和微型电阻、电容装配到一片片陶瓷基片上，然后再叠成立体结构，实现某种功能的电路组件。当时人们将这种电路称为固体组件。如美国仙童（Fairchild）公司利用 PN 结隔离技术，以平面工艺制作硅集成电路，并在氧化膜上制作互连线，这样奠定了半导体集成电路的基础，单片集成电路才真正实现。20 世纪 60 年代末集成电路进入了大规模阶段，因为 MOS 型集成电路比双极型集成电路更适合大规模和超大规模集成，从此 MOS 型集成电路得到迅速发展。20 世纪 70 年代中期到 80 年代后期，发展到超大规模集成电路阶段，集成电路的发展为计算机微型化创造了条件。20 世纪 80 年代末 90 年代初出现了甚大规模集成电路，使集成电路开始进入电子系统集成阶段。21 世纪集成电路进入巨大规模阶段，使不同类型的集成电路相互镶嵌，已形成了各种嵌入式系统（embedded system）和片上系统（SoC）技术。它可以将一个电子系统所需要的信号采集、转换、存储、处理和 I/O 接口等功能模

块，集成在一个芯片上，完成信息的加工与处理，从而实现一个完整的系统功能。

封装　集成电路制造中的封装工艺，通常要实现电路的电源分配、信号分配、散热通道、机械支撑和环境保护等功能。多数集成电路都是采用塑料封装或陶瓷封装工艺，陶瓷封装具有热导性和密封性好的优点，常用于散热和防湿性能要求高的场合。按照器件与印刷电路板的互连方式，封装可分为引脚插入型和表面贴装型两类。

（1）引脚插入型封装。主要有双列直插式封装（dual in-line package，DIP），DIP 的引脚从封装两侧引出，引脚可插入底座或电路板的导孔中焊接固定，是最普及的插装型封装。

（2）表面贴装型封装。常见的有以下几种：①小型平面引线式封装（small out-line package，SOP）的引线脚也是从封装两侧引出，且为扁平封装，引脚可直接焊接在印制电路板上，这种封装技术可节省空间，提高性能。②小型平面 J 型引线式封装（small out-line J-lead package，SOJ）是将引线向内侧弯成 J 型从而使其小型化的封装形式；PLCC（plastic leaded chip carrier）是由封装四周引出 J 型引线的封装形式，具有外形尺寸小、可靠性高的优点。③四周平面引线式封装（quad flat package，QFP）的引线电感小，可工作在较高频率。④球栅阵列封装（ball grid array package，BGA）的引线脚以圆形或柱状焊点按阵列形式分布在封装下面，引线脚长度减小，寄生参数进一步减小，对信号传输的完整性有好处。集成电路封装技术正向多引线化、高密度化、薄型化、多功能化和高散热性的方向发展。

jicheng luojimen dianlu

集成逻辑门电路　(integrated logic gate circuits)

将组成门电路的全部元件及连线集成在同一半导体基片上并进行封装的逻辑门电路，是数字逻辑电路最基本的单元。

分类　按所用晶体管结构、电路和工艺不同，集成逻辑门电路可分为双极型和单极型两大类。

双极型逻辑门　主要以二极管、双极型三极管作为开关元件，电流通过 PN 结流动。双极型逻辑门又分为电阻晶体管逻辑（resistance transistor logic，RTL）、二极管晶体管逻辑（diode transistor logic，DTL）、晶体管-晶体管逻辑（transistor-transistor logic，TTL）、发射极耦合逻辑（emitter-coupled logic，ECL）和集成注入逻辑（integrated inject logic，I^2L）等数字逻辑系列。其中，TTL 应用最为广泛，与单极型逻辑门相比，速度快，带负载能力强。但功耗较大，集成度较低，不适合做成大规模集成电路。

单极型逻辑门　以 MOS 管作为开关元件，电流通过导电沟道流动。单极型逻辑门又分为 PMOS 逻辑门、NMOS 逻辑门和 CMOS 逻辑门。CMOS 采用了 NMOS 和 PMOS 互补电路，速度比 NMOS 更快、功耗更小。与 TTL 相比，CMOS 电路具有制造工艺简单、功耗低、集成度高和抗干扰能力强等优点。在数字系统中逐渐占据了主导地位。

封装　集成逻辑门电路，大多采用双列直插式封装（DIP），如图 1 所示。DIP 封装的集成芯片都有一个缺口，如果将芯片插在实验板上且缺口朝左边，则引脚的排列规律为：左下管脚为引脚 1，其余以逆时针方向由小到大顺序排列。绝大多数情况下，电源从芯片左上角的引脚接入，地接右下引脚。一块芯片中可集成若干个（1、2、4、6 等）同样功能但又各自独立的门电路。比如，型号为 7400 的 TTL 集成门电路是 14 引脚双列直插式集成芯片，内部集成了四个独立的 2 输入与非门，每个与非门的输入和输出与引脚对应关系如图 2 所示。

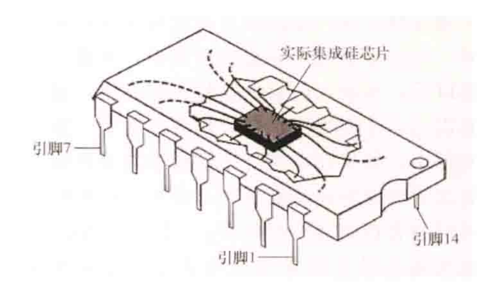


图 1　双列直插式封装集成组件

主要技术指标　衡量集成逻辑门特性的主要指标有：逻辑电平、扇出数（即带负载能力）、功耗、传输延迟（动态响应特性或开关速度）及噪声容限。

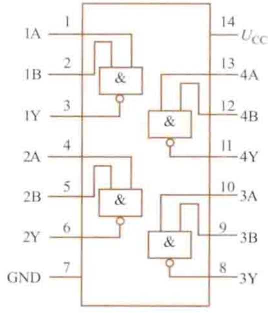


图 2　7400 接线图

逻辑电平：表示逻辑 0 和逻辑 1 的几个关键电压参数如图 3 所示的 U_{OHmin}、U_{OLmax}、U_{IHmin} 和 U_{ILmax}（见门电路）。同一系列器件输入的逻辑 0 和 1 与输出的逻辑 0 和 1 的电压范围不同，输入的电压范围比输出的电压范围大。不同逻辑系列数字器件的逻辑 0 和 1 的电压范围各不相同。

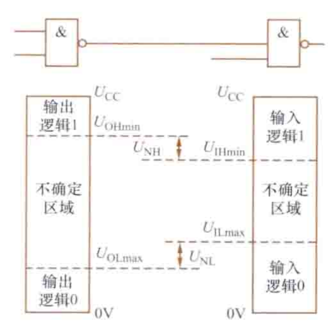


图 3　门电路输出和输入逻辑 0、1 范围

U_{OHmin}—输出高电平最小值；U_{OLmax}—输出低电平最大值；U_{IHmin}—输入高电平最小值；U_{ILmax}—输入低电平最大值；U_{NH}—高电平噪声容限；U_{NL}—低电平噪声容限

扇出数：在保证电路正常工作的条件下，输出最多能驱动的同类门的数量，是衡量逻辑门输出端带负载能力的重要参数。一个门输出通常是连接在其他门同类门的输入上，每个输入都消耗前级门的一定电流量，由于一个逻辑门只能提供一定的拉电流（流出门）或灌电流（流入门），一旦所带负载使输出端电流超过这个电流值，逻辑门就不能正常工作。一个逻辑系列根据其输入和输出电流参数可以确定扇出数。

功耗：逻辑门工作时消耗的功率。集成门电路需要直流电源（双极型常用 U_{CC} 表示，单极型常用 U_{DD} 表示）供电，电源提供的电流用 I_E 表示。功耗等于电源电压与 I_E 之乘积。输入全 0 时和输入全 1 时的功耗是不一样的，通常取其平均值。

传输延迟：加在门输入端的二值信号发生变化时，信

号从门的输入端传输到输出端的平均传输延迟时间，常用 t_{pd}表示，一般 TTL 门的传输延迟时间为几纳秒至十几纳秒。

噪声容限：门的输出信号传输到下一级门的输入端时，允许叠加的最大外部噪声电压。噪声电压一旦超出此容限，逻辑门将不能正常工作。噪声容限一般取高电平噪声容限（$U_{NH}=U_{OHmin}-U_{IHmin}$，如图 3 所示）和低电平噪声容限（$U_{NL}=U_{ILmax}-U_{OLmax}$）中较小的一个。噪声容限越大，表明该门构成的电路抗干扰能力越强。

jicheng wenyakuai

集成稳压块 （integrated voltage stabilizer） 将调整管、比较环节、基准电路等及其保护电路中的元器件和互连线集成在同一硅片上，使它的输出电压能保持恒定的稳压电路。集成稳压块的分类见表。

集成稳压块分类

分类依据	稳 压 块 名 称
内部电路工作方式	串联型稳压块（绝大多数集成稳压块是这种类型）； 高精度电压基准功能块； 开关型稳压块（见开关型稳压电路）
输出电压能否调节	输出电压固定的稳压块； 输出电压可调的稳压块
输出电压极　性	正输出电压稳压块； 负输出电压稳压块
稳压块引出端子数	多端（引出端子数多于 3 的统称多端）稳压块； 三端稳压块

三端输出电压固定式稳压块　这种稳压块只有输入端、输出端和公共端三个引出端子。在输入端加上厂家规定的电压，在输出端就能获得所要求的稳定电压。这类稳压块内部有健全的保护电路，安全可靠，稳定性能好，价格低廉，因而得到广泛的应用，已基本上取代了由分立元件组成的稳压电路。

图 1（a）所示为三端输出电压固定式稳压块（W7800 系列）的内部结构方框图，图 1（b）为其外形图。

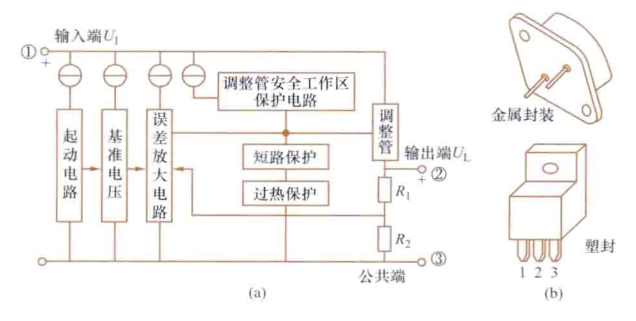


图 1　三端输出电压固定式稳压块

（a）内部结构方框图；（b）外形图

三端输出电压固定式稳压块有输出为正电压和输出为负电压两种。此外，利用它还可组成恒流源电路和输出电压可调稳压器等多种应用电路。

三端输出电压可调式稳压块　虽然输出电压固定式稳压块也可通过外接一些元件，对其输出电压进行调节，但由于此时其静态电流 I_Q 和 I_Q 随输入电压的变化量 ΔI_Q 值均很大，会影响输出电压的稳定性。

三端输出电压可调式稳压块（W117 系列）内部结构方框图如图 2 所示。它和图 1（a）所示电路不同之处在于：它将误差放大器、偏置电路、恒流源等的接地端改接到输出端，使它们在输入、输出的差值电压下工作，于是它们所消耗的电流都从输出端流出。由于没有接地端，它内部的基准电压（约 1.25V）相当于接在误差放大器的同相端和稳压块的调整端之间，并由一个恒流特性十分好的超级恒流源（约 50μA）供电。该恒定电流从调整端流出。由于 W117 的静态电流 I_Q 及 I_Q 的变化量 ΔI_Q 比 W7800 小得多，因此用它来组成三端输出电压可调式稳压块时，其稳压性能要好得多。当调整端接地时，它就是一个输出电压为 1.25V 的输出电压固定式三端稳压块。W117 内部放大器和偏置电路能在 2～40V 范围内工作。因此 W117 系列可实现输出电压 1.25～37V 连续可调，且最大输出电流可达 1.5A。同类产品还有三端输出负压可调式稳压块。

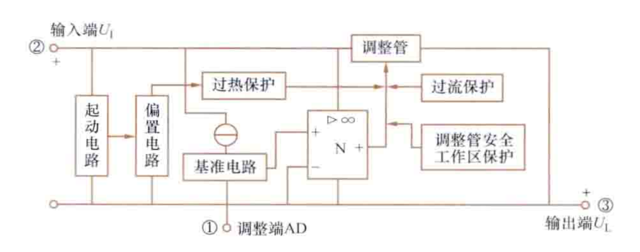


图 2　三端输出电压可调式稳压块内部结构方框图

W117 的基本应用电路如图 3 所示。图中R_1的阻值应按 $1.25V/R_1 \geqslant 100$、$I_Q=5mA$ 的原则选取，这样电流 I_Q 的影响就可忽略不计。W117 的输出电压为 $U_L=1.25\times(1+R_2/R_1)$。改变电阻$R_2$值，就可改变稳压输出 U_L 值。电阻 R_1、R_2 应选温度特性比较一致的同类型的电阻。电容C_2是为消除电阻R_2上电压的纹波而设置的。二极管 V1 的作用是，当输入突然短路时，为C_3放电提供一条通路；二极管 V2 的作用是，当输出短路时，为电容C_2放电提供一条通路。从而使它们不直接通过稳压块内部电路放电，起到保护稳压块的作用。

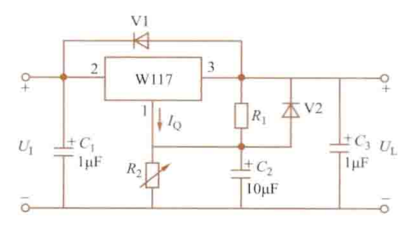


图 3　W117 的基本应用电路图

除基本应用电路形式外，还可用它组成电子关闭式、逻辑控制式、跟踪预调式、高输出电压（100V）等多种形式的应用电路。

多端稳压块　在集成稳压块的早期产品中，功率晶体管、采样电阻、消振电容等均需外接，因此产品的引出端通常都在 3 个以上，其输出电压可通过改变采样电阻的阻值直接进行调节。多端稳压块调节比较灵活，用它容易实现一些特殊功能，故在有些场合仍在应用。

高精度电压基准功能块　由于普通齐纳二极管的动态内阻大，噪声电压高，还具有一定温漂，用它来作高精度稳压电源的基准电压不合适，为此就出现了高精度电压基准功能

块。高精度电压基准功能块 LM113 是一种能隙式基准元件，它与一只稳压二极管的性能、用途及封装形式完全一样，其稳压值仅 1.2V。为了提高稳压值，人们又采用两管能隙电路制作了 2.5V、5V、10V 的三端式基准电压元件，它可以达到很高的稳定精度和很低的温漂。高精度电压基准功能块除应用能隙式电路来制作外，还可用次表面隐埋齐纳二极管技术制成以齐纳二极管为主体，配合以恒温电路的 6.9V 的高精度电压基准功能块，它的温漂极小。

jicheng yunsuan fangdaqi

集成运算放大器 (integrated operational amplifier)

具有高增益直流放大的集成电路，又称线性集成组件，通常简称运放。集成运算放大器一般采用双端输入、单端输出的结构形式，如图 1 所示。图中“+”为同相输入端，表示集成运算放大器输出端的信号 u_o 与该输入端信号的相位相同；“−”为反相输入端，表示输出端的信号与该输入端信号的相位相反。集成运算放大器两个输入端之间的电压差称为差模输入电压 u_{id}($u_{id}=u_{i2}-u_{i1}$)。两个输入端分别输入极性相同、大小相等的信号电压，称为共模输入电压u_{ic}，$u_{ic}=(u_{i1}+u_{i2})/2$。

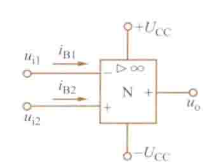


图 1 集成运算放大器结构示意图

集成运算放大器一般由三级放大环节组成，其简化原理框图如图 2 所示。三级之间采用直接耦合，故能放大缓慢变化的信号。

集成运算放大器主要用来放大各种信号，在与外电路连接后，可以实现各种运算功能。它具有以下特点：①集成运算放大器本身具有很高的电压放大倍数，达 10^4 倍以上；②高输入阻抗；③低输出阻抗；④共模抑制比 $K_{CMR}=\frac{|A_{ud}|}{|A_{uc}|}$ 很大，达 10^5 倍以上，式中A_{ud}为差模放大倍数，A_{uc}为共模放大倍数；⑤输入偏置电流、输入失调电流及输入失调电压均很小，约为微安级、纳安级、毫伏数量级。

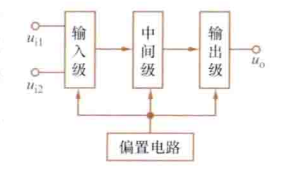


图 2 集成运算放大器电路原理方框图

工作原理 集成运算放大器在线性工作时，总是连接成图 3 所示的反馈电路形式。图中集成运算放大器在未接入外电路时，本身具有的A_{ud}称为开环差模电压放大倍数，即 $A_u=\Delta u_o/\Delta u_i'$。一般电路中$Z=Z_f$ // Z_1，// 是电阻并联符号。

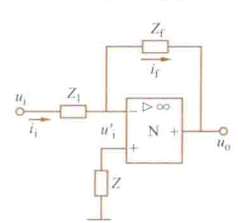


图 3 集成运算放大器接成负反馈电路形式

该电路属并联电压负反馈放大电路。由于在理想情况下，$A_{ud}\to\infty$，则 $\Delta u_i'=\Delta u_o/A_{ud}\to 0$，$\Delta i_B\to 0$。若运放的同相输入端为地电位，则反相输入端接近于地电位，通常称为“虚地”(并非真实的地，否则无输入信号)。由于$r_d\to\infty$，故 $\Delta i_i\approx\Delta i_f$。该电路的闭环电压放大倍数 $A_{uf}=\Delta u_o/\Delta u_i\approx -Z_f/Z_1$。

当$Z_f=R_f$、$Z_1=R_1$时，可组成比例放大器；若Z_f是电容器的容抗，则可组成积分器，依此类推。用运算放大器可以模拟各种数学运算功能，故称为运算放大器。

主要参数 运算放大器的参数种类繁多，各个制造商所给出的参数类型也可能不同。最基本的参数有直流和低频特性参数以及交流特性参数。

直流和低频特性参数 包括：①输入失调电压；②输入失调电压的温漂；③输入偏置电流；④输入失调电流；⑤开环差模直流电压放大倍数；⑥共模抑制比；⑦电源电压抑制比；⑧最大差模输入电压；⑨最大共模输入电压。

(1) 输入失调电压 U_{os}，即当输入信号电压为零时，为了使输出电压为零，在输入端必须加的补偿电压。输入失调电压一般是毫伏数量级，如采用双极型晶体管作输入级的运放，U_{os}约为± (1～10) mV，对于高精度、低漂移类型的运放，一般 $U_{os}<0.5$mV。在电路中 U_{os} 可用平衡电位器或调零电路来补偿。

(2) 输入失调电压的温漂 dU_{os}/dT。在一定温度变化范围内，失调电压随温度而变，dU_{os}/dT 是 U_{os} 的温度系数，一般约为± (10～20) μV/℃以下，高精度、低漂移类型的运放为±1μV/℃。可通过挑选温度特性较接近的晶体管作调零电路来补偿输入失调电压的温漂。

(3) 输入偏置电流I_B，是指两个输入端的静态基极电流I_{B1}和I_{B2}的平均值，即$I_B=(I_{B1}+I_{B2})/2$。双极型晶体管输入的运放，I_B约为 10nA～1μA。

(4) 输入失调电流 I_{os}，表示两个输入端的偏置电流之差，即 $I_{os}=I_{B1}-I_{B2}$。输入偏置电流和输入失调电流的温漂分别用 dI_B/dT 和 dI_{os}/dT 表示。产品手册中给出的参数 U_{os}、I_B、I_{os}是在一定电源电压、一定的测试温度和零共模输入电压条件下测得的，在不同条件下，会影响测得的数值。

(5) 开环差模直流电压放大倍数A_{ud}，是运算放大器工作在线性区时，输出电压变化和差模输入电压变化的比值，$A_{ud}=\Delta u_{od}/\Delta u_{id}$，或用分贝表示，$A_{ud}=20\lg(\Delta u_{od}/\Delta u_{id})$，dB。实际运算放大器的开环差模电压放大倍数是频率的函数，产品手册中给出的差模电压放大倍数均指直流(或低频)的电压放大倍数。一般A_{ud}约为 10^4 (或 80dB)。

(6) 共模抑制比 K_{CMR}，是运算放大器工作于线性区时，差模电压放大倍数A_{ud}与共模电压放大倍数A_{uc}之比，即 $K_{CMR}=\frac{|A_{ud}|}{|A_{uc}|}$ 或 $20\lg\left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right|$，dB。此处共模电压放大倍数是指当输入共模信号时，运放输出电压的变化与输入共模电压的变化之比，即 $A_{uc}=\Delta u_{oc}/\Delta u_{ic}$ 或 $A_{uc}=20\lg(\Delta u_{oc}/\Delta u_{ic})$，dB。$K_{CMR}$也是频率的函数。产品手册中给出的均为直流(或低频)时的 K_{CMR}。K_{CMR}值一般在 80dB 以上。

(7) 电源电压抑制比 PSRR，运算放大器工作在线性区时，电源电压变化 ΔE，将引起输出电压变化Δu_o。把Δu_o折算到放大器的输入端，即相当有一个输入电压 $\Delta u_o/A_{uf}$，A_{uf}为放大器的闭环放大倍数。$\Delta u_o/A_{uf}$ 与 ΔE 之比即是 PSRR，故 PSRR$=\frac{\Delta u_o}{A_{uf}\Delta E}$ 或 $20\lg\frac{\Delta u_o}{A_{uf}\Delta E}$，dB。若有正负电源，则两者的 PSRR 不一定相同。

(8) 最大差模输入电压 U_{Idmax}，是运算放大器两个输入端所允许加的最大电压差。当差模输入电压超过此电压值时，运算放大器输入级的晶体管基极与发射极之间的 PN 结将被反向击穿，甚至损坏。

（9）最大共模输入电压 U_{Icmax}，在实际电路中常会遇到既有差模信号成分又有共模信号成分的输入情况，如果共模成分超过一定限度，运算放大器就不能正常工作。这个极限就定义为 U_{Imax}。使用中一般不能超过此值。

交流特性参数　包括：①开环带宽；②单位增益带宽；③转换速度。

（1）开环带宽 BW，指运算放大器的开环电压增益值从直流增益下降 3dB（或直流放大倍数的 0.707 倍）所对应的信号频率。

（2）单位增益带宽 GB，指当用正弦小信号驱动时，运算放大器的 A_{ud} 下降为 1（或增益为 0dB）的信号频率。

（3）转换速度（有时也称压摆率）SR，指在额定负载的条件下，当输入阶跃大信号时，运算放大器输出电压的最大变化率，如图 4 所示。通常产品手册中给出的 SR 均指闭环放大倍数为 1 时的值。实际上，在转换期内，运算放大器的输入级是处于开环工作状态，故与其闭环放大倍数无关。一般 SR 约在 1V/μs 以下，而高速运算放大器的 SR>10V/μs。

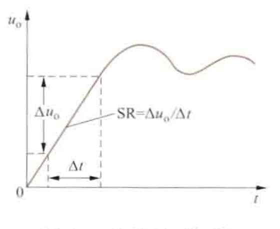


图 4　转换速率 SR

此外，还有差模输入电阻、共模输入电阻、输出电阻等参数。

jice dianzu cailiao

计测电阻材料

（resistive materials for measuring instruments）　用于制造各种测量仪表中的精密电阻的材料。对这种材料的要求是：电阻率高，电阻温度系数小、稳定性好，对铜的热电动势小。常用的计测电阻材料有锰铜、康铜、银锰合金、金铬合金、镍铬合金和铁铬铝合金等。

锰铜（manganin）　最典型的计测电阻材料。主要由铜、锰、镍组成，占 98% 以上。如添加 0.25% 铁和 0.1% 硅，则合金性能十分优良，对铜的平均热电动势小于 2μV/℃。若将电阻温度系数考虑到二次项，即

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta t + \beta\Delta t^2)$$

则在 20℃ 附近 $\alpha < 20\times10^{-6}$℃$^{-1}$，$-1\times10^{-6} \leqslant \beta \leqslant 0$℃$^{-1}$，电阻率 ρ 约为 $42\times10^{-8}\Omega\cdot$m，在 20～25℃ 范围内出现最大值。著名的伊莎贝林（Isabellin）合金、哈尔曼（Halman）合金等均属于优质锰铜系合金。

康铜（constantan）　即铜镍合金。由于它对铜热电动势可高达数十微伏，只宜用于交流仪表中作精密电阻。

银锰合金　除主要成分银、锰外，含少量锡。当合金成分配合适当时，其 α、β 优于锰铜。

金铬合金　价格较贵，对铜的热电动势略高于锰铜，但稳定性极好。

镍铬合金、铁铬铝合金　过去仅用作发热电阻材料，适当改变合金的成分及性能后，用作高电阻标准电阻，并用作小型化的精密电阻。

jisuanji

计算机

（computer）　一种按程序自动运行的现代化的信息处理机器系统，又称电脑。它由计算机硬件和计算机软件组成。它处理的对象是信息，处理的结果也是信息。计算机是脑力的延伸和扩充，是近代科学的重大成就之一。计算机基于存储程序来处理信息这一共性方法，决定了计算机应用的通用性和柔性。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“计算机”部分。

参考书目

王玉龙，付晓玲，方英兰．计算机导论．北京：电子工业出版社，2011．

瞿中．计算机科学导论．北京：清华大学出版社，2010．

jisuanji changdi jishu

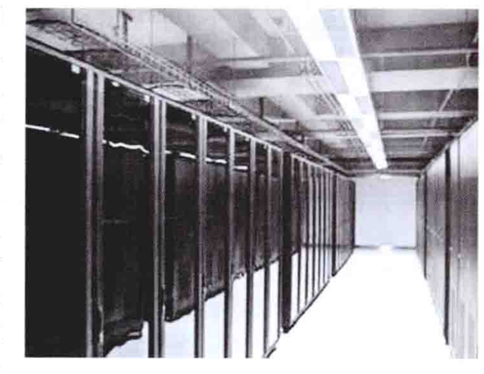
计算机场地技术

（technology of computer room）
保证计算机在使用环境下长期可靠运行所采取的一系列技术，是使用和维护好计算机的基本条件，其主要内容包括：

（1）使用空气调节系统保持机房（见图）内必需的温度与湿度。

（2）采用不间断电源系统（uninterruptible power supply，UPS）或交流稳压器对供给计算机的交流电稳压、稳频直至停电保护。

（3）采用隔离变压器、LC 滤波器及供电专线等措施，以抑制外部供电电路上的各种干扰电压的影响。雷电、高强度无线电波及高压电器设备会产生电磁干扰，当电磁干扰的场强达到一定强度时，就会影响计算机的正常工作，甚至导致计算机硬件的损坏。因此，机房应采取预防措施，如远离干扰源、对关键设备进行屏蔽或建筑机房时在墙壁内加入屏蔽层等。


机房

（4）有良好的接地系统。要求交流接地、直流接地与设备保护接地分别引入大地。

（5）机房内地板甚至墙壁的防静电措施。

（6）保持场地清洁度，避免磁头或磁盘表面积尘。

（7）机房应视计算机系统的性能、用途等情况酌情设置监视、防护设备。如红外线传感器、自动火灾报警器、温湿度传感器、监视摄像、漏水传感器、门警系统、照明设备、降噪设备等。

jisuanji fangzhen

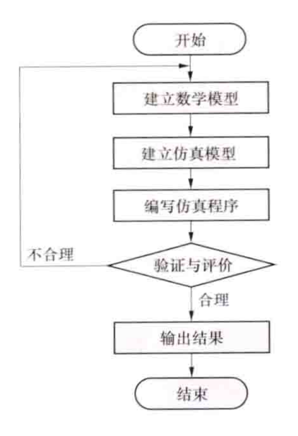
计算机仿真

（computer simulation）　用计算机建立、校验、运行实际系统的模型以得到模型的行为特性。其目的在于了解系统的特性及其内在联系。通过对模型的试验，可以对系统进行分析、性能评价、优选设计方案以及性能预测等。早期的仿真主要是物理仿真，它用易于实现、便于观察的物理过程模仿真实系统的过程。现代

仿真技术与计算机发展密切相关，全数字仿真技术已成为仿真技术的主流。

仿真技术已广泛应用于宇航、核能、电力、通信、计算机集成制造系统、化工、冶金等工程领域，包括我国2011年9月29日发射的“天宫”一号飞行器及“神舟”系列飞船的设计、核电站的设计、电力系统的规划与调度以及操作人员的教育与培训等。它可以缩短工程周期，降低系统成本，提高系统实验与训练过程中的安全，因而产生巨大的社会经济效益。对于社会、经济等非工程领域，由于不能直接进行实验，仿真技术更是研究的必要手段。

仿真流程　利用仿真技术解决实验问题大致可分为图中所示的几个步骤：①建立数学模型：根据研究目的、系统的先验知识以及实验的观测数据，把实际系统抽象成数学公式或流程图；②建立仿真模型：主要根据数学模型的形式、计算机类型以及仿真目的，将原始数学模型转换成仿真模型；③编写仿真程序；④仿真结果验证和评价；⑤输出结果。



仿真流程图

仿真语言　面向描述各类仿真模型的计算机语言。它具有三种功能：①模型描述的规范与处理；②仿真实验的执行与控制；③数据与结果的分析、显示及文档化。仿真语言可分为三类：①连续系统仿真语言，有CSSL、CSMP、ACSL、DONAMO等。它适用于常微分方程、偏微分方程和差分方程数学模型以及系统动态学模型。②离散事件系统仿真语言，有SIMULA、GPSS、SIMSCRIPT等。它适用于进程交互、事件处理或活动描述的代数方程数学模型和排队模型。③连续/离散混合系统仿真语言，有SLAM、SIMAN、GPSSF3等。它是上述两类模型的组合以及沟通它们之间的通信描述。

展望　随着计算机技术和人工智能的发展，将把面向建模与仿真方法学的知识或面向某种应用领域的知识引入系统环境，构成各种专家系统；将机器学习能力及面向目标的知识处理能力引入环境内，将可处理自然语言、图形与视频图像技术和多媒体技术等用于人机接口，构成高度智能化的面向用户、面向问题、面向实验的建模与仿真环境，从而使经典的仿真系统转变成新一代智能仿真系统。

jisuanji fuzhu sheji

计算机辅助设计　(computer-aided design，CAD)

利用计算机，采用系统工程方法，以人机交互方式，辅助设计人员完成设计任务的理论、方法和技术。它综合了计算机图形学、人机交互技术、工程数据库和设计方法等多个领域的理论、方法和技术，并与多媒体技术相结合。设计的对象纷繁复杂，涉及的范围广泛，包括从需要满足复杂工程需求的机械产品设计、电子产品设计、火电厂设计、水电站设计、建筑设计到追求创意和美感的美术设计、广告设计、时装设计等。CAD可以使设计人员利用计算机系统的高速计算和推理能力、精确而巨大的数据存储能力、方便的通信和编辑能力，加快设计速度，提高设计质量，降低设计成本，完成常人难以完成的设计任务。CAD是计算机应用的最重要分支之一。

简史　CAD的概念形成于1963年美国麻省理工学院I.萨瑟兰（Ivan Sutherland）等提出的人机交互绘图的思想之中。随后，汽车、飞机、印刷线路板的CAD系统相继研制成功并投入使用。在20世纪70年代，有限元分析方法程序的实现促进了工程CAD的发展；几何模型系统的实现和消隐算法的成熟改善了对象表达与显示能力；光栅扫描显示的使用使图形软硬件进入新的阶段。在80年代，微机图形系统和工程工作站日益普及，使CAD在电力、电子、建筑、机械、轻工、化工、纺织、军事等各行各业蓬勃发展，智能CAD、自动设计系统发展迅速。进入21世纪后工程工作站功能更强，速度更快，并向多处理机、开放系统和分布式系统发展。

CAD系统　包括CAD硬件系统和CAD软件系统。

CAD硬件系统　包括计算机、图形输入/输出设备、显示设备、网络设备等。CAD要求计算机速度快、容量大，以适应设计中大量的计算和数据处理工作；要求图形设备有合适的分辨率和色彩层次，以保证设计文件的精确性和生动性；要求设备联网，使协同设计的工程师们能共享数据，共享设备，彼此通信，从而提高设计质量，减少误差，降低成本。

工程工作站和微机图形设备是两种最常用的CAD硬件系统。工程工作站：①处理速度快，主存容量大，具有强大的图形、窗口功能和界面；②采用三维专用高速图形处理器及高分辨率显示设备；③具有高速网络接口。通用微机加图形设备也可以形成CAD硬件系统。它虽然效率不如同类工程工作站，但价格便宜，因此也被广泛使用。

CAD软件系统　包括通用CAD软件和专用CAD软件。

（1）通用CAD软件。也称CAD支撑软件，具有应用通用性。包括图形软件、模型软件、数据库、计算软件等。①图形软件。它提供一组基本图形元素（基元、图段等）和一组施加于基本图形元素上的操作（组合、变换、显示、输入、输出等）。②模型软件。它提供一组基本模型元素（长方体、球、圆柱、圆锥等）和一组施加于基本模型元素上的操作（交、并、差及几何计算等）。③数据库。它提供CAD数据的管理操作，有存、取、检索、分类和关系操作等。④计算软件。它提供设计中常用的计算方法，包括有限元分析程序、线性规划和其他优化程序。

（2）专用CAD软件。用于专门对象的设计，如建筑软件、机械软件等。专用软件采用切合设计对象的专门模型、特殊操作及适合该行业的交互界面，因此易学易懂，使用方便。专用软件通常在通用软件基础上二次开发而成。

CAD的方法　按照计算机介入设计过程的深度不同而不同，包括交互图形编辑方法、交互对象造型方法、参数计算方法、人工智能方法、动态模拟方法、自动设计方法等。使用自动设计系统时，用户给出设计条件，系统经过分析、综合、计算、修改，绘出设计的解（或是无解）。这种解可以是任意一个解，或是一个优化解，或是一个解的集合。

在人工智能方法中关于知识表示、推理、搜索、学习等基本技术，以及关于自然语言理解、专家系统、机器视觉等研究成果可以用于改善CAD的各个方面，如人机交互方法、对象综合方法、图形操作和数据库操作方法等。智能CAD是CAD研究的重要前沿。

CAD的设计结果具有数字形式，很容易与计算机辅助制造（computer-aided manufacturing，CAM）系统连接起来，用以控制数控机床、柔性制造系统和机器人生产产品。这样的系统称为CAD/CAM系统。在CAD/CAM系统中加入计划调度、财务管理、市场经营等功能，就是一个计算机集成制造系统。

jisuanji fuzhu zhizao

计算机辅助制造 （computer-aided manufacturing，CAM） 通过计算机与生产设备的直接或间接联系，对制造工厂的作业进行设计、管理和控制的过程及其技术。它包括：①计算机辅助制造的直接活动，实现对制造过程监测与控制。监测是指加工过程中的采样和分析，控制则是计算机按控制指令向加工执行机构发送控制信号。例如物料作业计划的运行控制（加工、装配、检测、输送和存储等）、生产控制和质量控制。②计算机辅助制造的间接活动，在制造过程中起支持性作用。如数控自动编程、计算机辅助工艺设计、计算机辅助工装设计与制造、制订生产作业计划、安排好原材料和外购件的订货与购买以及成品发货。CAM系统实质上是制造信息处理系统。

特点　CAM的核心是机械加工中用计算机控制如数控机床等数控设备。计算机的高速度和大容量保证了由它给出的控制信号的高速度和高精度（包括对监测信号的反应）；计算机可编程序的特点，又使得由它所控制的机器只要改变一下程序即可改变其原来的运动，去重复新的繁复的工作。用一台小型（包括微型）计算机控制一台数控设备称作计算机数值控制；用一台计算机分别控制若干台数控设备，称作直接数值控制；而在加工过程中根据监测到的参数变化，不断优化、补偿的控制称作自适应控制。

编程　CAM系统中，使用数控机床加工时，必须编制零件的加工程序。理想的加工程序不仅应保证加工出符合设计要求的合格零件，同时应能使数控机床功能得到合理的应用和充分的发挥，且能安全可靠和高效的工作。数控程序编程的方法有手工编程及自动编程两种。手工编程方法以分析零件图纸、制订工艺规程、计算刀具运动轨迹、编写零件加工程序单、制备控制介质直到程序校核，整个过程都是人工完成。自动编程方法由计算机进行工艺处理、数值计算、编写零件加工程序，自动地输出零件加工程序单，并将程序自动地记录到存储介质上，亦可由通信接口将程序直接送到数控系统、控制机床进行加工。自动编程的方法主要有语言编写方法和计算机图形编程方法。数控编程语言被用作编制零件的数控程序，以控制点位、连续控制系统以及2～5坐标数控机床等数控设备加工零件。计算机图形编程使CAM可以直接从计算机辅助设计数据库获得信息，产生零件加工工艺规程，并由此生成加工零件的数控程序。整个过程允许用户通过可视化图形，以交互方式修改生成数控程序。

应用　用一台计算机控制一台数控设备，如数控铣床、数控车床、数控镗床和数控磨床等是CAM中最基本的加工单元。其中，带有刀具库，能对一次装夹在上面的零件进行多种加工的机床叫数控加工中心。由多台数控机床（包括加工中心），配上传输装置或工业机器人，在计算机的统一控制下排成的流水线，则能完成复杂零件、部件，甚至整个产品的加工或装配。和传统的只能生产单一产品的流水线相比，这种流水线很容易通过改变程序来使之适应制造新的产品，因而灵活得多，故被称作柔性制造系统。工业机器人和数控机床一样，是一种由计算机控制的、通用的可编程机器，只是它具有一定的模拟人的特征的能力，特别是它有机械手，这使它非常适合做装卸工件、点焊、喷漆、装配等制造过程中必不可少的工作。

发展方向　随着计算机技术的发展，要求CAD和CAM系统中，不同功能模块都与公用的工程数据库相连接，使信息流能连续传递，以便把越来越多的CAD和CAM功能融合为一体，组成CAD/CAM集成系统。CAD/CAM技术不仅向集成化方向发展，而且正朝着可视化、智能化和网络化方向发展，为计算机集成制造奠定基础。

jisuanji guocheng kongzhi

计算机过程控制 （computer process control） 计算机参与各类过程控制的系统及其技术。系统对被控对象（过程）的有关参数进行采样，并经模数转换变成数字量送给计算机，按预定的控制规律进行计算，再通过数模转换，把计算结果转换成模拟控制量，对过程进行控制，使被控制量达到预期的指标。计算机过程控制不仅应用在宇宙航行、导弹制导、机器人以及核技术等新兴学科中，而且在金属冶炼、电力、机械制造等领域获得广泛应用。它为提高产品质量、改善劳动条件和提高经济效益发挥着重要的作用，是自动化技术发展的一个重要方向。

分类　计算机过程控制系统可以按照功能、控制规律和控制方式进行分类。

按照功能分类可分为五类：操作指导控制、直接数字控制、监督控制、分级控制和集散型计算机控制。

（1）操作指导控制：对生产过程的大量数据作巡回检测、处理、分析、记录以及参数的越限报警，指导操作人员调节各回路参数或直接控制执行机构。它主要用于监督生产和新模型的试验。

（2）直接数字控制（direct digital control，DDC）：计算机作为闭环控制回路中的一个控制与决策部件。DDC除了能实现比例-积分-微分（proportion-integration-differentiation，PID）调节规律外，还能进行多回路串级控制、前馈控制、滞后补偿控制、多变量解耦控制以及自适应等复杂规律的控制等。

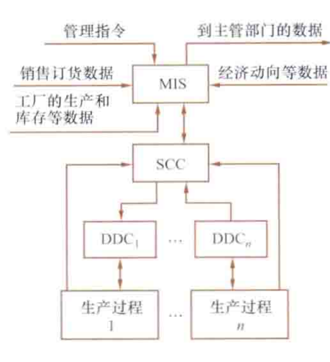
（3）监督控制（supervisory computer control，SCC）：根据生产过程的工艺参数，按数学模型计算最佳控制值，在线实时修改DDC的设定值，实现最优、自适应、智能等复杂控制。SCC可以提高系统的可靠性。

（4）分级控制（hierarchical computer control，HCC）：现代工业生产规模庞大，过程复杂，信息量大。为协调各生产设备的工作和生产管理任务，HCC采用多级多目标的体

系结构。典型的分级控制系统见图。DDC级用来控制生产过程，SCC级主要用来实现最优控制和自适应控制，指挥DDC级工作并向生产管理级（MIS）汇报。MIS主要任务是根据经济动向、销售、订货、原料供应以及生产情况，进行产品预测，制定长期规划、安排生产和销售计划。分级控制系统解决的不是局部最优化问题，而是全局总任务最优化问题。

（5）集散型计算机控制（distributed computer control，DCC）：以微处理机为核心，实现地理上和功能上分散的控制，又通过高速数据通道把各个分散点的信息集中起来，进行集中的监视和操作，并实现高级复杂规律的控制。

按照控制规律可分为4类：①程序和顺序控制。系统被控量按照预先规定的时间函数变化。②比例-积分-微分（PID）控制。调节器的输出是调节器输入的比例、积分和微分的函数。③有限拍控制。要求设计的系统在尽可能短的时间里完成调节过程。④智能控制。运用人工智能、控制理论和运筹学技术，在未知环境下，仿效人类的智能，借助于专家经验、启发式直观判断和直觉推理等机制，实现对过程的控制。智能控制常见的有多级递阶控制、专家控制、自寻优控制、自学习控制、基于神经网络控制和模糊控制等。



典型分级控制系统

计算机控制系统按照控制方式还可分为开环控制、闭环控制和复合控制。

发展简史　过程控制理论的发展，大致分为三个阶段。第一阶段是以20世纪40年代兴起的调节原理为标志，称为经典控制理论阶段。它研究的主要对象多为线性定常系统，主要解决单输入单输出问题，研究方法主要采用以传递函数、频率特性和根轨迹为基础的频域分析法。

第二阶段以20世纪60年代兴起的状态空间法为标志，称为现代控制理论阶段。它研究的主要问题是多输入多输出系统，不仅研究线性系统，也可解决非线性或分布参数特性系统问题。通过建模实现了从直接根据被控对象的物理特性的方法向建立一般化的参数估计与系统辨识理论的扩展。

第三阶段是20世纪80年代兴起的智能控制理论阶段。以人工智能和自动控制相结合为主要标志，并吸收运筹学、信息论、系统论、计算机科学技术、模糊数学、实验心理学、仿生学和生理学等学科的思想、方法和研究成果，以实现控制的综合自动化。

jisuanji kekaoxing jishu

计算机可靠性技术　（computer reliability technology）

使计算机可靠运行的方法和措施。

计算机系统的可靠性　指在规定条件下和给定时间内计算机系统正确运行（计算）的能力。正确运行的判断标准为：①程序不为故障所破坏或停止；②结果不包括由故障所引起的错误；③执行时间不超过一定的限度；④程序运行在允许的领域内。与计算机系统可靠性密切相关的还有系统的可用性和可维性，可用性指计算机系统的使用效率，可维性指系统可维修的状况。通常采用的可靠性指标是平均无故障间隔时间（mean time between failure，MTBF），即系统能正确运行时间的平均值。

计算机系统可靠性设计　计算机设计过程中必不可少的内容。高的可靠性指标靠容错和非容错两种方法来实现。

非容错法　预先消除不可靠因素，以保障可靠性的设计方法。主要包括：在允许的成本范围内选择或筛选出最可靠的元件，使用成熟可靠的连接装配技术，采取有效的措施屏蔽可能的外界干扰等。

非容错法设计不能一次完成。在确定初步方案后，要利用已知或者预测到的元件和互连的可靠性来定量估算系统或者分系统的可靠性。另外还须对系统和分系统进行功能仿真和测试，以保证逻辑设计的正确性，最后完善系统的诊断测试。

容错法　针对计算机系统运算过程中出现的故障或者低可靠性元件，采取相应措施以提高系统可靠性的设计方法。根据故障失效的持续时间、影响范围和出现频率，选用不同的防护性冗余是容错法的设计内容。容错设计是建筑在非容错设计基础上的，首先要对运行性故障进行调查分类，并确定其等级，然后针对不可靠因素及其程度采用各种有效的容错措施，最后用分析或者实验的方法来验证容错的效果。

冗余　提高计算机系统可靠性的一项重要技术，包括硬件冗余、软件冗余、信息冗余和时间冗余，它们互不排斥，大多数计算机系统具备多种冗余。

（1）硬件冗余。分静态硬件冗余、动态硬件冗余和混合硬件冗余。①静态硬件冗余：通过附加元件的办法来屏蔽故障，使系统的功能不受影响，常见的有双工、模3表决冗余等。②动态硬件冗余，首先检测并确定故障所在的部位，然后用备份单元替代失效单元，有选择地修复故障。它要求系统有模块结构并附有故障检测和部件切换电路。③混合硬件冗余：混合使用静态和动态硬件冗余。

（2）软件冗余。用附加软件设备的方法来达到容错目的。优点是能在硬件设计完成之后增加系统的容错功能，常用技术有关键程序或者数据多处存储、程序和微程序上附加测试手段，以及增设程序入口和出口点等。

（3）信息冗余。指系统内增加的某些数据，这些冗余数据是为了提高可靠性所需要的，纠错码是信息冗余的典型例子。

（4）时间冗余。在时间允许的条件下，通过重复执行以消除瞬时的偶然性故障，简称“复执”。复执允许在微动作、指令、程序段或者整个作业等各种级别上进行。

jisuanji ruanjian

计算机软件　（computer software）

计算机系统中的程序及其文档。用计算机解某一问题时，程序是对该问题的处理对象和算法的描述，通常选用某种程序设计语言书写，它必须装入计算机才能运行。文档是指与软件研制、使

用和维护有关的资料以及为了便于理解程序所写的说明，可以书面形式提供，也可以存在计算机中。硬件和软件是计算机系统的两大组成部分。硬件是指计算机及其配套的外围设备，是物质基础。软件是用户与硬件之间的接口，担负着计算机系统的指挥职能，可用来扩大计算机功能和提高计算机的效率。软件的发展以硬件为基础，其发展也促进了硬件、计算机科学技术及其他科学技术的发展。

发展过程　20世纪50年代的计算机只能运行较简单的程序，主要的应用对象是科学计算。当时设计和编制程序为个体工作方式，使用低级语言（机器指令或汇编语言）编写，强调编程技巧。随着第二代和第三代计算机的出现，为了充分利用计算机系统资源，提高编程效率，扩展计算机向非数值计算领域的应用，出现了操作系统、高级程序设计语言、编译程序以及数据库系统等。此时应用领域迅速扩大，软件的复杂程度大大增加。到了20世纪60年代中期，产生了软件危机，主要表现在研制周期和成本大大超出预算，正确性和可靠性不能保证。为了摆脱这一困境，在1968年提出了软件工程的概念，在方法学上提出结构程序设计方法，开发方式逐步由个体化合作方式转化为工程化方式，研究的对象从顺序程序发展到并行程序。为了适应计算机网络的需要，出现了网络软件。为了加强对软件开发的支持，20世纪70年代中期出现了软件支撑环境，形成了计算机辅助软件工程。20世纪80年代随着微型计算机的迅速发展，促进了分布式应用和分布式软件的研制。由于应用领域的需要，出现了嵌入式软件，其特点是受制于它所嵌入的宿主系统（如武器系统、通信系统）。20世纪90年代面向对象技术逐渐走向实用，它使用对象、类和继承机制，开发由对象组成的软件。20世纪90年代后期以后，软件研究快速发展，软件体系结构的研究、基于构件的软件、中间件的研制、软件过程的研究、各种软件开发规范与软件模型、软件工具的智能化、自动化、集成化、并行化、自然化等蓬勃发展起来。大量的软件工具涌现出来，用以支持软件的开发、运行、维护。

分类　按照功能和服务对象来分，软件可分为系统软件、支撑软件和应用软件三类：①系统软件。它位于计算机系统中最靠近硬件的内层，供各种用户使用，包括操作系统、汇编程序、编译程序、网络软件以及各种服务程序等。②支撑软件。支撑其他软件的开发、运行、维护的软件。旨在提供开发软件的各种工具，并将它们集成为整体的开发环境，如文本编辑软件，文件格式化软件，用以支持需求分析、设计、实现、测试和支持管理的软件工具。③应用软件。指特定应用领域专用的软件，包括事务软件、工程与科学计算软件、嵌入式软件、实时软件、基于Web的软件等。事务软件如商业管理信息系统、办公自动化；工程与科学计算软件如天气预报、系统仿真软件；嵌入式软件如家电控制软件、手机软件；实时软件如工业控制，计算机辅助制造等；基于Web的软件如网络教育、电子商务等。

主要内容　包括程序设计、翻译程序、编译程序、实用程序、操作系统、软件工程、网络软件以及数据库系统等。

软件系统　包括操作系统、中间件系统、数据库系统、汉字信息处理系统、嵌入式系统、网络软件系统以及人机交互系统等。

jisuanji tuxingxue

计算机图形学　（computer graphics）　研究用计算机生成图形的理论、方法和技术的学科。它包括图元表示、输出图元的属性、几何变换、几何图形的观察与生成、光照模型和面绘制算法、颜色模型与应用、计算机动画等。它是一门与计算几何、图像处理和多媒体等学科关系密切的综合性的交叉学科。

发展简史　图形显示器是计算机图形学产生和发展的基础。在阴极射线管运用之后，显示技术就得到迅速发展，而在计算机出现以后不久，显示技术就开始和计算机结合起来。1950年由计算机控制的图形显示器已能够产生简单的图形。1953年实时控制的计算机显示系统SAGE系统投入使用。最早用于计算机辅助设计的是美国麻省理工学院的SKETCHPAD系统（1962年）。此后，图形显示技术迅速发展。在早期，计算机图形学赖以存在和发展的物质基础是随机扫描显示器和数字绘图机，它们都是矢量型设备（基本图形元素是矢量或线段），当时计算机图形学研究的基本问题诸如图形的生成、变换、裁剪、消去隐藏线以及人机交互功能都与此密切相关。20世纪80年代光栅显示技术的发展大大降低了设备费用，使图形处理技术的应用遍及科学技术的许多领域。此外，还出现了许多其他显示器件（液晶显示、激光显示等）。随着光栅显示技术的发展，图形生成的许多新课题也被提了出来，如消去隐藏面、光照明模型和阴影处理等。自然景物的模拟、计算机动画等已引起图形学界的普遍兴趣。因此，计算机技术和图形硬件及应用领域的发展推动了计算机图形学的发展，反之，计算机图形学的发展也促进了专用图形硬件和应用的发展。

学科内容　计算机图形学的主要内容有：①图形用户接口和交互输入方法：研究在应用系统中怎样通过对话来构造和管理图形的成分，选择菜单项、指定参数值，以及选择和定位文字串，以构成人机交互的图形用户接口。②真实感图形的生成、显示和输出：利用在计算机内的数据、采用几何造型、光照模型和颜色模型以及消隐等技术生成真实感的图形，以使图形尽可能表现出立体感、层次感和光照效果；并把生成的图形在显示器屏幕上显示或在绘图机、打印机等图形设备上输出。③研究各种新的图形生成问题：自然景物的模拟、动态显示等。

应用与前景　计算机图形学的应用领域和发展前景极广，主要有：计算机辅助设计、计算机模拟与仿真和计算机美术与计算机动画制作。

（1）计算机辅助设计：许多工程设计均涉及图形信息，汽车、飞机、船舶的外形设计，建筑物的外形、色彩、布局及室内装饰设计，各种机械结构的形状及表示其力学性能的各种曲线，各种线路、管道的布局、布线设计，衣片及其他裁片的排料、落料，集成电路和各种电子器件的设计等。这些均可借助于图形显示及交互技术进行计算机辅助设计，有许多场合可与计算机辅助加工相连接，便构成了计算机辅助制造系统。

（2）计算机模拟与仿真：利用实际景物、器件的计算机

模拟与仿真，可以进行诸如模拟驾驶员训练、模拟打靶训练、模拟机械加工过程或机器人的动作过程器。

（3）计算机美术与计算机动画制作：已达到实用化、商品化的地步。20 世纪 90 年代，计算机动画技术应用于电影特技取得显著成就。

此外，它还可用于各种实时过程监控、情报资料和办公文件中图形信息的计算机生成，计算机层析成像（computerized tomography，CT）立体图像的生成，分子模型的立体显示、虚拟现实中真实感图像的生成，以及科学计算可视化等。进入 21 世纪，基于计算机图形学等多种技术的虚拟现实技术的研究和发展引起了高度重视，2008 年 2 月，美国工程院公布了评选出的 21 世纪人类在工程技术领域所面临的 14 个重大挑战性问题，其中之一是“增强虚拟现实的逼真性和应用性”。中国政府 2006 年颁布的“国家中长期科学和技术发展规划纲要”、日本政府 2007 年 5 月发布的长期战略报告“创新 2025”都把虚拟现实作为重点支持的方向。

jisuanji wangluo

计算机网络　（computer network）　地理上分散的、能独立运行的多台计算机为共享资源和交流信息而互连成的系统。图 1 是计算机网络示意图。

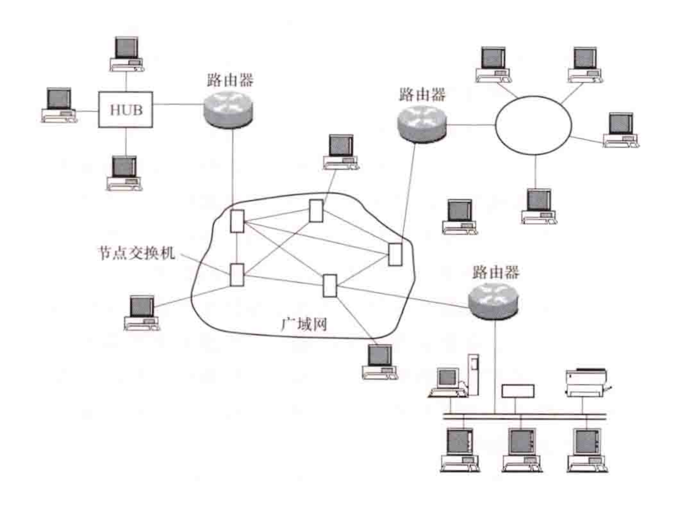


图 1　计算机网络示意图

构成　计算机网络有三个主要部分：①多台主机，它们向各用户提供服务。②一个通信子网。由一些专用的通信处理机和连接这些结点的通信链路所组成。③一系列的协议。协议是通信双方事先约定好的并必须遵守的规则。图 2 是计算机网络构成图。

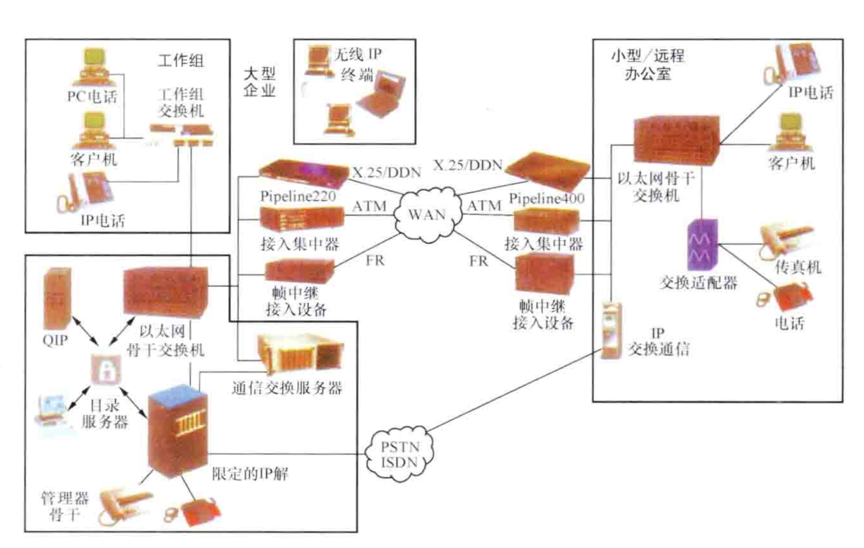


图 2　计算机网络构成图

功能　利用计算机网络可以实现以下功能。①数据、多媒体信息和文件的传输，为宽带可视电话、电视会议、电视监视、信息检索、电子函件、视频点播、远程教育、远程广告、电子出版等提供多种信息业务。②软件资源共享，包括数据库、工具和应用软件的共享等。③硬件资源共享，包括大型机、巨型机处理能力和特殊外部设备的共享，并可按任务或计算机所在地区的时差实现负荷分散和均衡。④提高可靠性，个别计算机出现故障，可改用网内其他或冗余的计算机访问网络资源。

交换方式　交换是指在两个或多个节点之间建立暂时性的通信线路（或链路）。交换方式有电路交换、报文交换、分组交换和快速分组交换等。

（1）电路交换。在电路交换的网络中，双方建立一条带宽固定的连接，直到通信完毕才释放连接。

（2）报文交换。将信息分成一个个称为报文的单元，各报文在网络中传输是相对独立的。每个报文含信息头和信息尾，信息头中有源节点地址和目的结点地址信息等，信息尾中有误码检测信息。通信前双方不需要建立连接，源结点直接将报文沿目的结点方向发往下一个中间结点。中间结点接收完报文后进行误码检测，若发现有错，则要求前一结点重发，若未检测到错误，则存储信息并继续向下一个结点转发，直至目的结点。

（3）分组交换。分组交换与报文交换技术相似，只是在分组交换中将信息单元进一步分小，即将报文分成多个分组，每个分组中包括有目的结点地址、源结点地址、检验字节等，是一个个相对独立的信息单元，分组长度可变。分组交换有两种方式：数据包和虚电路。这种方式，只有当一个分组在链路上传输的瞬间才占用该链路，因而可提高线路利用率，缩短传输延迟，提高传输质量。它适用于传输突发式的数据。

（4）快速分组交换。这种交换技术已应用于宽带综合业务数字网（B-ISDN）。在 B-ISDN 中：①分组长度固定。异步转移模式（ATM）交换中的分组长度为 53 个字节，称为信元。这样便于硬件来实现交换功能，提高交换速率。图 3 所示为 ATM 网。②面向连接。即通过信令系统向网络请求，若呼叫请求被接纳，则建立一条从源结点到目的结点的虚电路。③简化了协议。由于光纤传输媒介误码率很低，因此将差错控制从原链路级移至端到端级。

分类　根据网络作用的地理范围，计算机网络分广域网、城域网和局域网。

（1）广域网。也称远程网。作用范围在几十到几千千米，可覆盖一个国家，或实现国际、洲际网络互联。美国的ARPANET、各国的电路交换或分组交换公用数据网（见分组交换公用数据网）以及行业的专用网络（世界气象信息交换、国际航空订票等）。

（2）城域网。覆盖大城市及市郊（在50～100km左右）的高速共享通信网，传输速率在150Mbit/s或以上。支持数据、数字化语音和视图传输。用于连接大型计算机和局域网，也可互联宽带综合业务数字网。20世纪80年代后期提出的分布队列双总线网（DQDB），是采用双向总线，流向相反。DQDB的总线时隙分为预先仲裁和排队仲裁时隙，分别传送等时和非等时业务。这种网络具有信道利用率高、访问延迟小等优点。

（3）局域网。局限于部门专用的较小通信范围的计算机网络。

分层　计算机网络是一个庞大而复杂的系统，从结构角度把网络按功能在逻辑上划分为若干层，每一层在低层所提供的服务的基础上，增加其功能，向高层提供更完善的服务。国际标准化组织把开放系统互连参考模型（open system interconnection/reference model，OSI/RM）划分成七层，明确规定了各层的功能和服务（见开放系统互连），以利于各层的设计和实现。随着超大规模集成电路的发展，商品化网络的低层功能大都已由固化实现。20世纪80年代后期，已推出了一些高速的网络层和运输层的协议控制器芯片，促进了网络通信控制器和网络互联器功能的提高。

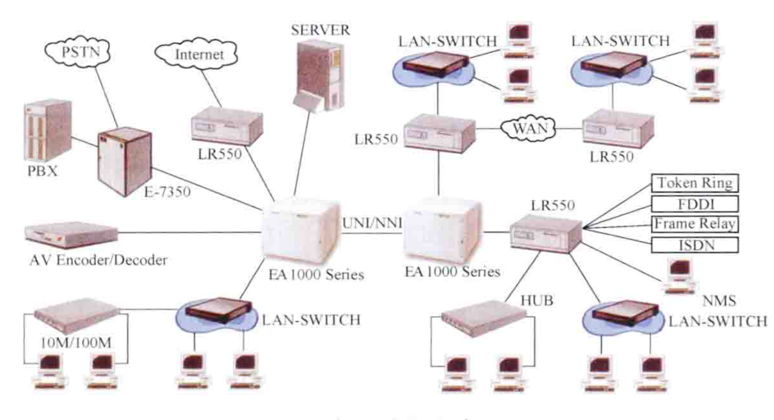


图3　ATM网

网络互联　两个（或两个以上）网络通过中继系统中的路由器、桥路器、网关实现互相联通。按所处层次的不同，中继系统可分为转发器、网桥、路由器、桥路器和网关。①转发器。物理层的中继系统。连接网络的两段传输媒体（同轴电缆等），以延伸同一网络的作用范围。②网桥。数据链路层中继系统。含单一的逻辑链路控制规程，但可有不同的介质控制及物理层规程。③路由器。网络层中继系统。含单一的网络规程，但可有不同的数据链路层和物理层规程。④桥路器。兼有网桥和路由器功能的设备。⑤网关。任何高于网络层的中继系统，即互联不同高层协议的网络。

发展　早期的计算机通信方式是面向远程终端的联机系统，由主机系统、通信处理机、调制解调器、多路复用器等设备及终端经电话网的租用专线或交换线路连成网络。1969年底，ARPA网络投入运行，开创了分组交换网的新纪元。20世纪70年代后期推出了总线式以太局域网。80年代又推出多种媒体访问控制方式的局域网和高速光纤网络。80年代初法国开始了第一个综合业务数字网（ISDN）的试验网，把声音、数据、图像等多种信息，转变为数字化代码进行传送。这样可综合多种信息传输业务于一个数字网传送，既方便了用户，也提高了网络经营者的经济效益。以高速光纤网为交换主体的宽带综合业务数字网也正在发展之中。

参考书目

谢希仁．计算机网络．6版．北京：电子工业出版社，2013.

jisuanji xitong anquan yu baomi

计算机系统安全与保密

（security and secrecy of computer system）　泛指计算机系统的设备安全、数据保护和数据保密等。采取安全保护措施保护计算机系统中的硬件、软件及数据，防止因偶然或恶意的原因使系统或信息遭到破坏、更改或泄露。

造成计算机系统不安全的因素分自然灾害构成的威胁、偶然或无意构成的威胁以及人为攻击的威胁三类。①自然灾害构成的威胁，包括火灾、水灾、风暴、地震等破坏以及环境（温度、湿度、振动、冲击、污染）的影响；②偶然或无意构成的威胁，包括硬件设备故障、突然断电或电源波动大、测不到软件错误或缺陷等；③人为攻击的威胁，包括国外间谍窃取机密情报、内部工作人员的非法访问、用户的渎职行为以及利用计算机技术进行犯罪等。

计算机系统面临的威胁和攻击分为对实体的和对信息的两类，计算机犯罪和计算机病毒则包括了对这两方面的威胁和攻击。对实体的威胁和攻击指对计算机及其外部设备和网络的威胁和攻击。对信息的威胁和攻击主要有信息泄露和信息破坏。计算机犯罪指利用暴力和非暴力形式，故意泄露或破坏系统内的机密信息，威胁系统实体和信息安全的不法行为。计算机病毒则是一段附着在其他程序上的可以实现自我繁殖的程序代码。

对计算机系统安全的要求主要有实体安全、网络通信安全、软件和信息安全、管理组织与制度安全、安全技术措施。①实体安全，如周围没有危险建筑，机房环境达到要求，有监控系统、备用电源，有防水、防火、防雷、防静电、防盗措施等。②网络通信安全，如设“机房重地”标志，重要线路和装置有备份，有加密、安全审计跟踪、访问控制、身份识别等措施。③软件和信息安全，如操作系统及数据库要有访问控制措施，应用软件等能防止恶意攻击和非法存取，对数据库及系统状态要有监控、防护措施，有用户身份识别措施，开机要有输入用户名、口令要求，系统用户信息要异地备份等。④管理组织与制度安全，如有专门的安全防范组织和计算机安全员，有健全的安全管理规章制度、详尽的工作手册和工作记录、安全培训制度等，要定期进行风险分析。⑤安全技术措施，如采用开发工作与业务工作分离的措施，有灾难恢复、服务器备

份、计算机防病毒措施、系统操作日志等。

jisuanji xitong jiegou

计算机系统结构 (computer architecture) 从机器语言程序设计者或编译程序设计者所看到的计算机物理系统的抽象结构或属性，即概念性结构和功能特性。

计算机系统结构一词是1964年IBM公司G. M. 阿姆德尔（G. M. Amdahl）等人为解决程序可移植性，按系列机的概念提出的。所谓系列机就是先设计一种系统结构，软件设计者在这种系统结构上设计系统软件，硬件设计者按照系列机内各档性能、价格的不同，采取多种不同计算机组织来实现这种系统结构。系列机的根本特征是软件兼容，即所编程序可以不加修改地运行于高档机（向上兼容）或后期推出的机器（向后兼容）上。

系统结构涉及的机器属性一般包括：数据表示、寻址方式、寄存器定义、指令系统、中断机构工作状态的定义和切换、机器级的输入/输出结构和对信息的保护等。如精简指令系统计算机和复杂指令系统计算机便是两种不同的体系结构；向量计算机与标量计算机也是不同的体系结构。

多线程处理机结构，这种结构在指令发射以前，先对指令进行整理，将指令流分解成若干个不相关的指令流小组，然后分别发射到不同的流水线中去执行。多处理机计算机系统是计算机发展的重要方向。

计算机系统结构作为学科，主要研究内容包括：软件和硬件的功能分配和对软件、硬件的界面确定，计算机系统结构对高级语言和操作系统的支持，并行处理技术、并行算法及并行处理计算机系统，大型计算机，巨型计算机，计算机网络与分布式计算机系统，可靠性技术，计算机系统性能评价等。

jisuanji yingyong

计算机应用 (computer application) 计算机在生产、科学研究、文化、管理、经营以及其他各种社会活动中的应用所涉及的原理、技术和方法。计算机应用的核心技术是如何以计算机的方式表达世界中的各种问题，也称表达模型。围绕各种问题的表达模型，形成计算机应用的各种理念、方法、技术和系统结构。

学科结构　计算机应用技术与计算机系统结构、计算机软件与理论并列为计算机科学与技术的学科之一。应用领域主要有科学计算、数据处理、过程控制、CAD/CAM/CIMS、人工智能和计算机网络。①科学计算，是计算机最早的应用领域，也称数值计算。②数据处理，指对大量的数据进行加工处理，是使用计算机和其他辅助方式，把人们在各种实践活动中产生的大量信息按照不同要求，及时地收集、存储、整理、传输和应用，也称非数值计算。③过程控制，指利用计算机的高速度、高精度等特性，通过运行事先编写好的程序，实现生产的自动化，被广泛应用于机械、石油、化工、电力、铁路等各个部门。④CAD/CAM/CIMS：计算机辅助设计（computer aided design，CAD）是利用计算机高速、可存储数据等特性帮助设计人员进行设计，广泛应用于制造业产品设计、建筑、美工、服装等行业。计算机辅助制造（computer aided manufacture，CAM）是利用计算机控制各种机床、设备，实现产品的加工、装配、检测、包装等工作的自动化技术。计算机集成制造系统（computer integrated manufacture system，CIMS）是指以计算机为中心的现代信息技术应用于企业管理与产品开发制造的新一代制造系统，是CAD、CAPP（computer aided process planning）、CAM、CAE（computer aided engineering）、CAQ（computer aidied quality）、PDMS（product data management system）、管理与决策、网络与数据库及质量保证系统等子系统的技术集成。⑤人工智能：指利用计算机模拟生物特有的智能行为的理论和技术，应用非常广泛，如自然语言理解、数据库的智能检索、专家咨询系统、定理证明、博弈、机器人学等。⑥计算机网络，是计算机技术和通信技术结合的产物，目标是资源共享。

发展过程　20世纪四五十年代，科学计算和工程计算问题是主要的计算机应用领域，这类问题的计算量大、数据量少。20世纪50年代末到70年代初，数据处理和计算机控制成为主要的计算机应用领域。20世纪八九十年代，计算机辅助设计与制造、计算机认知模拟进入计算机应用的主要领域。20世纪90年代以来，随着计算机网络的发展，特别是Internet的出现，计算机应用向分布式和集群式计算发展。

意义和影响　计算机应用对当代人类社会的各方面均产生重大影响，不仅大大改变人类在生产、贸易、管理、科教、文化等领域的活动方式，提高效率与质量，还促进许多新学科，如计算几何、计算数学、计算化学、计算物理学、计算生物学、计算天文学、认知心理学等的形成和发展。计算机应用已成为计算机科学技术的带头子学科之一。它所提出的问题及其在理论、方法、结构方面的成果，如专用集成电路、智能计算机、多媒体、面向对象方法、窗口系统、智能操作系统、人工神经网络、认知模拟理论、图形、图像、语音、中文输入输出设备等，正有力地引导着计算机硬件、软件、理论和外围设备的发展。

jisuanji yingjian

计算机硬件 (computer hardware) 计算机系统中由电子、机械和光电元件等组成的各种物理装置的总称。这些物理装置按系统结构的要求构成一个有机整体为计算机软件运行提供物质基础。计算机硬件的功能是输入并存储程序和数据，以及执行程序把数据加工成可以利用的形式。从外观上来看，计算机硬件由主机箱和外部设备组成。主机箱内主要包括中央处理器、内存、主板、硬盘驱动器、光盘驱动器、各种扩展卡、连接线、电源；外部设备包括鼠标、键盘、显示器、音箱等，这些设备通过接口和连接线与主机相连。图1所示为硬盘驱动器。

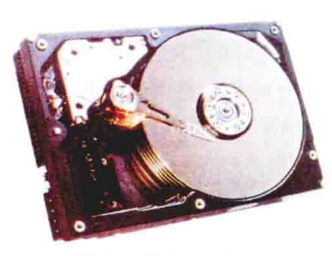


图1　硬盘驱动器

如图2所示，构成计算机系统的部件和设备主要有运算器、控制器、主存储器、输入设备、输出设备、辅助存储器和电源等。

运算器　计算机中执行各种算术运算和逻辑运算的部件。运算器由算术逻辑单元、累加器、状态寄存器和通用寄存器组成。运算器将取自主存储器或内部寄存器的数据，按指令操作码的规定执行“加”“减”“乘”“除”等四则运算或“与”“或”“非”“移位”“比较”等逻辑运算，运算结果存入主存储器或暂存内部寄存器。

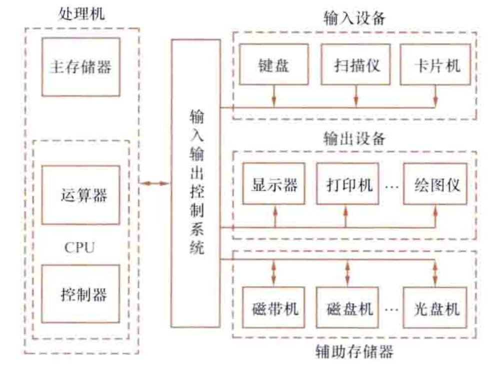


图2　计算机硬件系统组成结构框图

控制器　整个计算机系统的指挥中心，负责对指令进行分析并根据指令的要求有序地、有目的地向各个部件发送控制信号，使计算机的各部件协调一致地工作。控制器由指针寄存器、指令寄存器、控制逻辑电路和时钟控制电路等组成。

控制器与运算器结合构成中央处理器（central processing unit，CPU）。根据控制信号形成方法的不同，控制器结构有硬联逻辑控制和微程序控制两种。反映CPU品质的最重要的指标是主频和数据传送的位数。主频说明了CPU的工作速度，主频越高，处理速度越快。CPU的数据传送位数是指计算机在同一时间能并行传送和处理的二进制信息位。

主存储器　存储二进制信息（包括程序和数据）的部件，与CPU直接相连，当前运行的程序和数据都存放在主存中。主存储器中的信息以字节为单位，按顺序线性编址的一维结构形式组成，按地址随机存取，它能和运算器、控制器以及其他高速部件直接传送信息。主存储器和中央处理器结合构成计算机主体，或称主机。

辅助存储器　为了弥补主存储器容量不足而设的附加存储器，主要由磁带、磁盘、光盘、U盘等组成。辅助存储器主要存放当前程序暂时不用而整个程序运行过程中需要的或用户不用而系统需要的文件信息、各种数据库、标准子程序库等。存于辅助存储器中的程序和数据，只有在调入主存储器后才能被CPU执行和处理。辅助存储器的存取速度较慢，存取时间不确定，但它的存储容量大、价格低。

输入设备　用于把载于某种媒体（如扫描仪、卡片、磁表面等）上的信息（数据、程序、文字、图形、图像及声音等）变换成计算机能接受、识别和处理的信息形式的设备。输入设备可分成两大类：采用媒体的输入设备和交互输入设备。采用媒体的输入设备有硬盘驱动器、光盘驱动器、USB闪存驱动器、磁带机、卡片输入机、光学字符阅读机、扫描仪、摄像头等。交互输入设备有键盘、光笔、鼠标器、触摸屏、跟踪球手写输入板、游戏杆、语言输入装置等。（见输入设备）

输出设备　用于把计算机中的二进制电信号转换成用户能识别和理解的并能在某种媒体上记录或显示的信息形式的设备。常用的输出设备有绘图仪、软盘驱动器、光盘驱动器、显示器、打印机以及过程控制中的数字/模拟转换装置等。

输入/输出控制系统　控制输入/输出设备与计算机之间协调工作的部件。输入/输出设备不能直接和计算机系统相连，需要专门的接口电路，即输入/输出控制系统，来完成主机和外设之间信息形式的转换和传输。输入/输出控制主要有五种工作方式，即简单程序控制、程序中断、直接存储器存取、通道以及设置专门的输入/输出处理机。常用的输入/输出控制接口包括显卡、硬盘接口、串行接口、并行接口、USB（universal serial BUS，USB）接口等。

（1）显卡：主机和显示器之间的接口电路，也称显示适配器，它的主要作用是把主机要显示的字符、图形、图像等经过显示卡电路的转换，用显示器可以接受的方式传送给显示器显示。显卡的显示标准主要有单色显示适配器（monochrome display adapter，MDA）、彩色图形适配器（color graphic adapter，CGA）、增强图形适配器（enhanced graphics adapter，EGA）、视频图形阵列（video graphics array，VGA）、超级视频图形阵列（super video graphics array，SVGA）。

（2）硬盘接口：常用的硬盘接口有集成开发环境（integrated development environment，IDE）接口、增强型集成驱动电子电路（enhanced integrated drive electronics，EIDE）接口、高速直接内存存取（ultra direct memory access，ultra DMA）接口和小型计算机系统接口（small computer system interface，SCSI）。

（3）串行接口：按二进制位进行数据传输的接口电路。计算机常用的串行接口标准是RS-232C。

（4）并行接口：可同时传输若干个二进制位的接口电路。常用的并行接口为打印机接口。

（5）USB接口：具有即插即用和热插拔功能，是目前广泛应用的新型接口技术。主板一般都采用支持USB功能的芯片组，而且安装了USB接口插槽。数码相机、数字音箱、扫描仪、打印机、键盘和鼠标、U盘、智能手机等都普遍使用USB接口。

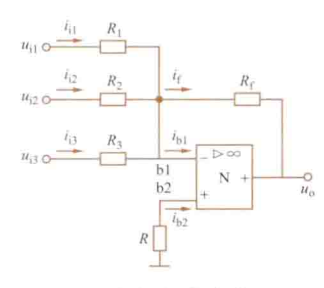
电源　为计算机各个部件正常运行提供能源支持的部件。

计算机硬件已向微型化、智能化方向发展，超大规模集成电路技术的应用，提高了计算机硬件系统的固化层次和功能。新的计算机系统结构和新的算法的提出以及应用领域的进一步开拓是推动计算机硬件发展的重要因素。

jiafa dianlu

加法电路　（summing circuit）　把集成运算放大器（简称运放）连接成能实现若干个电压相加的放大电路。它广泛用于多个信号的综合电路中，是进行算术运算的基本单元之一。如图所示，三个电压u_{i1}、u_{i2}、u_{i3}各自串联一个电阻接到运放的反相输入端b1，故该电路又称反相加法电路或倒相加法电路。图中$R=R_1 // R_2 // R_3 // R_f$，“//”表示电阻并联。

设图中的运放N为理想元件，即开环电压放大倍数



反相加法电路

$A_{uo}\to\infty$，差模输入电阻$r_{id}\to\infty$，输出电阻$r_o\to 0$，共模抑制比$K_{CMR}\to\infty$，失调、漂移均为零，频带宽度$BW\to\infty$，则当输出电压u_o为某一定值时，运放的差模输入电压$u_{b2b1}=u_o/A_{uo}\to 0$，即运放的两个输入端b1、b2几乎同电位，故称两输入端为“虚短”，即两输入端好像短路，而实际上并非短路。由于同相输入端b2经R接地，故b2处于地电位，运用b2与b1的“虚短”概念，b1点又称为“虚地”点。当分析b1或b2点的电压关系时，常利用“虚短”概念。

由于图中运放的差模输入电阻$r_{id}\to\infty$，所以，在输入电压信号作用下，自b1（或b2）流入运放的电流i_{b1}（或i_{b2}）$\to 0$，故又称b1与b2间为“虚断”，即b1与b2间好像断路，而实际上并没有断路。当分析b1（或b2）点上的电流关系时，常利用“虚断”的概念。

因b1点为“虚地”，故$u_{b1}\to 0$，得$i_{i1}=\dfrac{u_{i1}-u_{b1}}{R_1}\approx\dfrac{u_{i1}}{R_1}$，$i_{i2}\approx\dfrac{u_{i2}}{R_2}$，$i_{i3}\approx\dfrac{u_{i3}}{R_3}$。因b1与b2间为“虚断”，故$i_{b1}=0$，$i_f=i_{i1}+i_{i2}+i_{i3}=\dfrac{u_{i1}}{R_1}+\dfrac{u_{i2}}{R_2}+\dfrac{u_{i3}}{R_3}$。因$u_o=-i_fR_f$，故得$u_o=-\dfrac{R_f}{R_1}u_{i1}-\dfrac{R_f}{R_2}u_{i2}-\dfrac{R_f}{R_3}u_{i3}$。若$R_1=R_2=R_3=R_f$，则得$u_o=-(u_{i1}+u_{i2}+u_{i3})$。式中负号表示倒相相加。若适当选择$R_f$、$R_1$、$R_2$、$R_3$之值，则可得倒相放大加法电路。如果在电路图的后面串联一个倒相电路，则可得到非倒相的加法电路，于是$u_o=u_{i1}+u_{i2}+u_{i3}$。

jiafaqi

加法器 （adder） 实现两个二进制数相加的组合逻辑电路。两个一位二进制数相加的电路有半加器和全加器。多位二进制数相加的电路，按照进位方式的不同，分为串行进位加法器和超前进位加法器。

半加器　两个一位二进制数A与B相加时，不考虑低位进位的加法器称为半加器（half adder，HA），符号图见图1（a），其中，S表示和（Sum），C_O表示进位（Carry）。逻辑功能如表1所示，由表可以写出S和C_O函数式分别为：$S=A\oplus B$，$C_O=AB$。

全加器　两个一位二进制数A、B相加时，考虑相邻低位的进位C_I的加法器称为全加器（full adder，FA），符号图见图1（b）。逻辑功能如表2所示。由表可以写出S和C_O的逻辑表达式，并整理如下

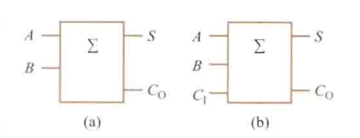


图1　一位二进制加法器符号
（a）半加器符号图；（b）全加器符号图

$$S=\overline{A}\,\overline{B}C_I+\overline{A}B\overline{C_I}+A\overline{B}\,\overline{C_I}+ABC_I=A\oplus B\oplus C_I$$
$$C_O=\overline{A}BC_I+A\overline{B}C_I+AB\overline{C_I}+ABC_I=(A\oplus B)C_I+AB$$

表1　半加器功能表

输入		输出		输入		输出	
A	B	S	C_O	A	B	S	C_O
0	0	0	0	1	0	1	0
0	1	1	0	1	1	0	1

表2　全加器功能表

输入			输出		输入			输出	
A	B	C_I	S	C_O	A	B	C_I	S	C_O
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1

串行进位加法器　将n个全加器级联，将低位进位输出端接到相邻高位的进位输入端，可实现两个n位二进制数相加的电路。逻辑电路如图2所示，$S_{n-1}\sim S_0$为和输出，C_{n-1}为进位输出。

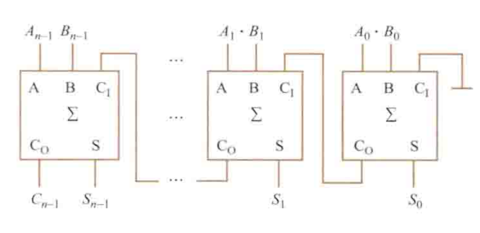


图2　串行进位加法器逻辑电路

图2中，低位进位产生后才能建立起电路高位相加的结果，因此这种结构的电路称为串行进位加法器或行波加法器。串行进位加法器的缺点是运算速度慢，执行一次n位数相加的加法运算，需要经过至少n级全加器的传输延迟，才能得到稳定可靠的运算结果。但其电路原理简单清晰，在运算速度要求不高的场合仍得到应用。

超前进位加法器　为提高运算速度，通常使用超前进位加法器。图3为中规模4位二进制超前进位加法器74LS283的图形符号。其中A0～A3、B0～B3分别为4位加数和被加数输入端，S0～S3为4位和输出端；C_I为低位进位输入端，C_O为进位输出端。

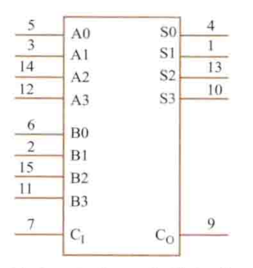


图3　4位二进制超前进位加法器74LS283的图形符号

这种电路能提高运算速度的原因是进位信号不再逐级传递，而是采用超前进位技术直接计算最高位进位。

超前进位加法器最高位进位信号C_O的表达式为$C_O=f(A_0,\cdots,A_3,B_0,\cdots,B_3,C_I)$，即4位二进制数加法的进位信号仅由加数、被加数和最低位进位信号C_I决定，与中间进位无关，在加法求和的同时，也进行C_O的运算，有效地提高了运算速度。

加法器位数越多，进位输出逻辑式的输入变量数越多，对应电路也越复杂。可见，运算速度的提高是靠增加电路复杂程度换取的，中规模集成超前进位全加器多为4位。

jianliu ji

检流计 （galvanometer） 测量微小电流、电压和电量的高灵敏度磁电系指示电表。多用于电桥、电位差计中作指零仪。它有多种类型，包括普通检流计、冲击检流计、振动检流计及振子等。

普通检流计 用悬丝或张丝支承可动部分，如图1（a）所示，由光标显示读数。检流计的光指示器读数装置有两种：光机构与标尺位于仪器内部，称为内装式或光点检流计，如图1（b）所示；光系统和标尺是单独的部件，使用时安装在仪器外部，称为分装式或镜式检流计，如图1（c）所示。

使用检流计时应注意三个参数：①外临界电阻；②电流常数；③阻尼时间。对图1（a）的结构，动圈无短路的金属框架，阻尼力矩由动圈本身提供，故可动部分的运动状态与检流计外接电路的电阻有关；使检流计工作在临界阻尼运动状态下的外接电阻值称为外临界电阻。使检流计可动部分偏转每单位分格所需的电流量值称为检流计的电流常数，它的倒数是检流计的电流灵敏度。当检流计的指示偏转到满刻度时断开外电路，从这一瞬时起，检流计可动部分摆动一周所需的时间称为自由振荡周期。通常关心的是阻尼时间，即检流计工作在临界状态下，从最大偏转切断电流开始到指示器回到零位所需的时间。

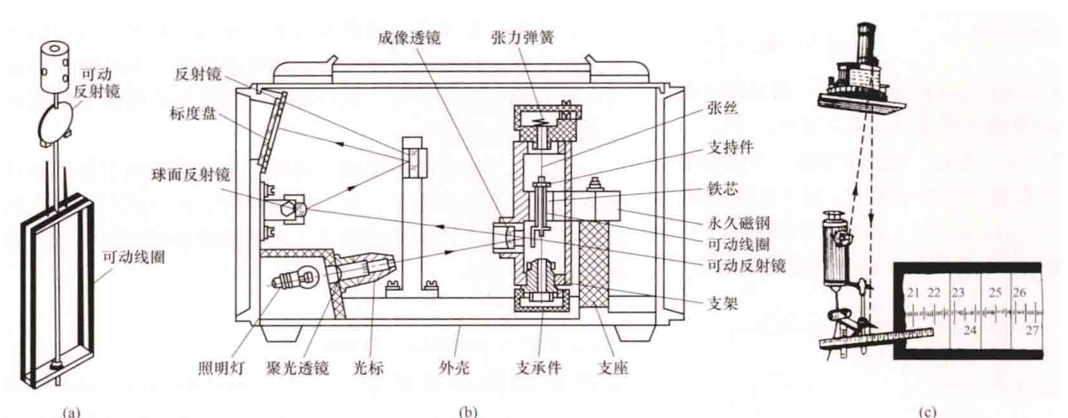


图1 检流计结构

（a）可动部分；（b）内装式；（c）分装式

使用检流计时应注意：①按正常工作位置安放，有水准仪的检流计必须先调节，使其放置水平，再检查其偏转是否良好；使用前须将光点调到零位。②按说明书选好外临界电阻，使其工作在近于临界状态。③测量时，灵敏度应逐步提高；若事先不知通过检流计电流的大小，应串接一保护电阻，以避免烧坏检流计。④搬动检流计时，必须将开关置于“短路”位置上，或锁上线圈机械止动器；如无短路开关和止动器，可用导线将检流计两接线端子短接。

冲击检流计 通过读出可动部分第一次摆动的振幅来测量电量值的检流计。为增大可动部分的转动惯量，通常在动圈上安装负荷件，也有加宽动圈的，如图2（a）所示。脉冲电流作用后，可动部分偏转到某一最大偏转值α_m，如图2（b）所示，电量Q可按下式计算：$Q=C_Q\alpha_m$，其中C_Q为检流计的冲击常数，其单位为库每格（C/格）。冲击常数与冲击检流计外电路的闭合电阻有关，在测量冲击常数和电量时，不允许外电路闭合电阻有变化。

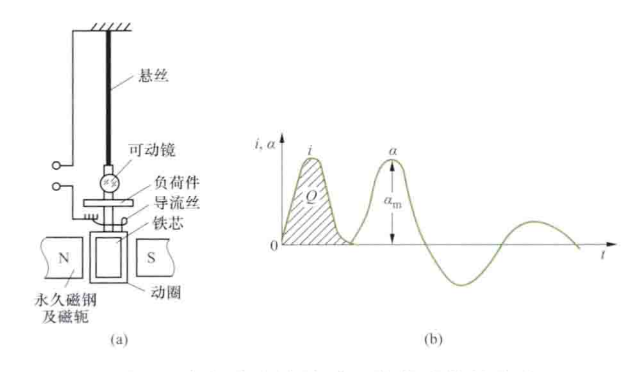


图2 冲击检流计的原理结构及特性曲线

（a）结构；（b）特性曲线

振动检流计 调整可动元件固有频率，使之与被测对象或被检测电流的频率发生谐振的检流计，是用来检测交流小电流（或电压）的电表。它的可动部分可以是动圈、动磁铁或磁化动片，其特点是质量轻、体积小，从而转动惯量小；用反作用力矩较大的张丝以增加固有振荡频率，使之与被测交流小电流（或电压）的频率谐振。

振动检流计常用于工频测量，在交流补偿器和电桥中作指零仪，其谐振频率为(50±5)Hz，对高次谐波有一定抑制作用。它的电压灵敏度约为15×10^{-5}V/mm，电流灵敏度约为10×10^{-8}A/mm。由于灵敏度低，它多被电子式指零仪等替代。

振子 可动部分的质量和转动惯量都很小的检流计，也称振动子。振子是光线示波器的关键部件，其结构如图3所示。振子中，由张丝支承的可动部分（动圈或回线）被装在圆柱形框架里，再外加封装套管。

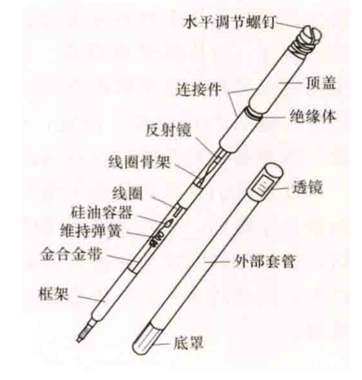


图3 振子结构

对于多点光线示波器，是将多个振子并排装入记录仪的共磁部件中，当动圈中通过被测交流电流时，从振子小镜上反射出的光点经过多次反射在感光纸上移动，从而记录下被测信号波形。振子的应用范围通常从直流到8000Hz以下的交流。

jianfa dianlu

减法电路 (subtracting circuit) 把集成运算放大器（简称运放）连接成能实现若干个电压相减的放大电路。它广泛应用于多个信号的综合电路中，是进行算术运算的基本单元之一。图 1（a）为用一个运算放大器实现的减法电路。设运放为理想元件，则由叠加原理得

$$u_o = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_{i2} - \frac{R_2}{R_1} u_{i1}$$

图 1 减法电路
（a）用一个运放实现的减法电路；
（b）带调零电位器的电路

当 $R_1 = R_3$、$R_2 = R_4$ 时，上式可化简为 $u_o = \frac{R_2}{R_1}(u_{i2} - u_{i1})$。可见，图 1（a）中的电路可实现两个输入信号 u_{i2} 和 u_{i1} 的差值放大，故又称差动放大器，其放大倍数为 $\frac{R_2}{R_1}$。

图 1（a）电路中要求有两对完全相等的电阻，对挑选电阻和调试带来不便。如果两对电阻不能完全相等，则当 $u_{i2} = u_{i1} = 0$ 时，输出电压 u_o 将不等于零。为此，电路中增加一个调零电位器 R_W。R_W 两端施加一个较低的正负电源 U，调节 R_W 的滑动触点，即可使当 $u_{i2} = u_{i1} = 0$ 时，$u_o = 0$，如图 1（b）所示。

如果需要减数和被减数有不同的放大倍数，则可采用图 2 所示的电路。图 2 为实现 $3u_{i2} - 2u_{i1}$ 运算的减法电路。把减数 u_{i1} 先经运放 N2 倒相放大 2 倍，被减数 u_{i2} 先经 N1 倒相，再经 N2 倒相放大 3 倍，从而实现了 $u_o = 3u_{i2} - 2u_{i1}$ 的运算。

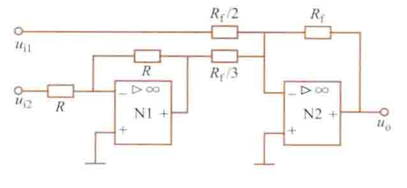


图 2 用双运放实现的减法电路

jiangjie guanceqi

降阶观测器 (reduced-order observer) 利用系统输出量和输入量来观测或重构出必要的和足够的部分状态的装置，也称降维观测器。无论是调节器还是跟踪问题，实现最优控制都必须取得全部状态变量以实施状态反馈，因此要构造状态观测器。但是，构造能观测全部状态的“全阶”观测器是复杂的，也可构造较为简单的降阶观测器。

设系统的状态向量是 n 维的，控制向量是 p 维的，输出向量是 q 维的，系统的输出矩阵满秩，状态观测器理论指出，状态向量的 q 个分量可以由能够测量到的输出向量直接产生，其余的 $n-q$ 个状态变量则由降阶观测器来估计或重构。

jiaoliu

交流 (alternating current, AC) 量值和方向随时间作周期性变化，且一周期内平均值为零的电流。交流这两个字义常和其他名词一起构成复合词，例如交流电压、交流电路等。交流瞬时值 i 的数学表达式为 $i = g(t)$，其中，时间函数 $g(t)$ 有如下两个性质

（1） $g(t) = g(t + nT)$

式中 T 为瞬时值重复变动的最小时间间隔，称为周期，单位为秒（s）；n 为整数。周期的倒数 $f = 1/T$ 为单位时间内波形重复的次数，称为频率，单位名称为赫兹（Hz），简称赫。

（2）$\int_0^T g(\tau)\mathrm{d}\tau = 0$，即一周期内 $g(t)$ 的平均值为零。

波形是正弦形的交流，称为正弦交流，是最常见的交流。

动力用电一般都采用交流电源。中国和欧洲国家工业用电的标准频率一般定为 50Hz，称工频。美国和北美国家则采用 60Hz 作为惯用的工频。科技和工程上遇到的交流，其频率可由 10^{-4} Hz 到 10^{12} Hz。

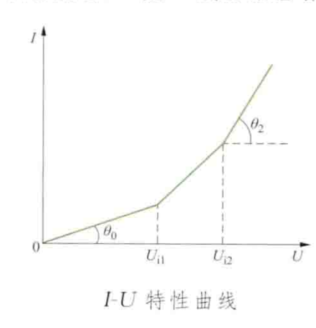
电力系统中通常用同步交流发电机作交流电源，它是根据电磁感应定律制成的。发电机将热能、水能、核能、风能等不同形式的能量转换为电能。交流输电的突出优点是可以用变压器方便地改变交流电压的大小。这样，就可以用适中的电压发电，再用高电压进行高效率的长距离输电，然后用合适的低电压配电和用电。直流输电不能用变压器来改变电压，仅少数长距离电力线路采用直流输电。此时，发电机发出交流电压，经变压器升压后，用整流器将交流电能变为直流电能，作远距离传输。然后用逆变器把直流电能变为交流电能，再用变压器降压。

交流除了能高效率传输电能外，交流异步电动机在结构上也比直流电动机简单，在工业中得到了广泛的应用。在信息传输方面也广泛地用到交流，例如载波通信用的载波电路就是利用了交流。

jiaoliu dianliu jizengdian shiyan

交流电流激增点试验 (AC abruptly increasing point test) 由交流电流-电压特性来鉴定电机绕组绝缘老化程度的一种试验方法。

对于绝缘老化或浸渍不充分的电机绕组，流经绝缘的交流电流有效值 I 与施加在绝缘上的电压有效值 U 之间的典型特性曲线如图所示。当电压较低，在 $U < U_{i1}$ 时，绝缘中没有放电，I 随 U 成正比地增加。当电压达到 U_{i1} 时，放电电压较低的一些气隙开始放电，随着电压的上升，电流以较快速度增加。电压进一步增加时，更多的气隙发生放电。当电压到达 U_{i2} 后，放电程度剧增，随电压的上升，电流以更快的速度增加。对应于 U_{i1} 和 U_{i2} 的点分别称为第一、第二电流激增点。绕组的击穿电压与第二电流激增点电压间存在一定关系。对发电机绕组，击穿电压约为 U_{i2} 的 2.3 倍。



I-U 特性曲线

由第二电流激增点电流上升率的增长倍数 $m_2 = \tan\theta_2 / \tan\theta_0$，电流增加率 $\Delta I = [(I - I_0)/I_0] \times 100\%$（$I$ 为绕组在额定电压 U_n 下的实际电流，$I_0 = U_n \tan\theta_0$），以及根据 U_{i2} 预测的击穿电压可以判断电机绕组绝缘的老化程度。当 $m_2 > 1.6$，且 U_{i2} 小于绕组额定电压 U_n 时，或由 U_{i2} 预测的击穿电压小于 $(2.5 \sim 3)U_n$ 时，或 ΔI 超过 8.5%～12% 时，

认为绕组绝缘已老化。

jiaoliu dianqiao

交流电桥 (alternating current bridges) 由电阻、电容、电感等标准元器件与被测元器件组成的电桥，用于测量交流电参数，也用于测量电参数的残量（如电阻时间常数、电介质损耗因数）以及转化为电参数的一些非电量。

原理 交流电桥的原理接线如图1所示。$\underline{Z}_1$、$\underline{Z}_2$、$\underline{Z}_3$、$\underline{Z}_4$ 四个阻抗组成电桥的四臂；测量用桥路的构成方式是使其中三个臂为标准阻抗元器件，第四臂为待测阻抗。电桥的一对顶点（a 和 c）之间接正弦交流电源，另一对顶点（b 和 d）之间接检测仪表。当检测仪表指零，即 b 和 d 两顶点间无电位差时，桥路达到平衡状态。此时，四臂阻抗间满足关系 $\underline{Z}_1/\underline{Z}_2=\underline{Z}_3/\underline{Z}_4$，此关系也称平衡条件。交换电源与检测仪表的位置，此关系仍成立。

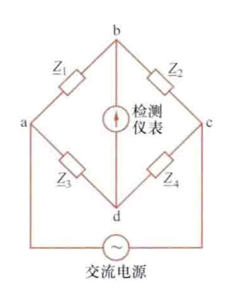


图1 交流电桥原理接线图

若令 $\underline{Z}_1=Z_1e^{j\varphi_1}$，$\underline{Z}_2=Z_2e^{j\varphi_2}$，$\underline{Z}_3=Z_3e^{j\varphi_3}$，$\underline{Z}_4=Z_4e^{j\varphi_4}$，$\underline{Z}_i=Z_ie^{j\varphi_i}$（$i=1,2,3,4$），其中 Z_i、φ_i 分别是各桥臂阻抗的模和辐角，则平衡状态关系式可改写为 $Z_1/Z_2=Z_3/Z_4$，$\varphi_1+\varphi_4=\varphi_2+\varphi_3$。这表示要使桥路达到平衡状态，各臂阻抗的模间和辐角间必须满足一定的配置关系。为使电桥达到平衡状态，一般要反复调节其中两个标准元器件的量值。交流电桥的平衡状态不受电源电压高低的影响。

在组成实际交流桥路时，为简化结构并提高其工作性能，通常电桥的一些臂由接近理想情况的标准元器件构成，如采用残量很小的纯电阻或纯电容元器件。

交流电桥各桥臂对测量所起的作用可看作是：三个由标准元器件组成的桥臂中，其中两相邻桥臂提供准确、固定的或可变的电压（或电流）比值，而剩下的一个桥臂则作为与第四桥臂即待测阻抗进行比较的标准量。

电桥可由工频电源或音频振荡器供电，其中的检测仪表可用振动检流计、阴极射线示波器、晶体管毫伏表、听筒或特制的交流检测仪表。

经典交流电桥 由正弦交流电源供电的交流电桥产生于19世纪80年代。到20世纪50年代，出现了万用交流电桥、麦克斯韦-维恩电桥、海氏电桥、欧文电桥、西林电桥、谐振电桥等数十种用于不同测量目的的电桥电路，它们大多以发明者的姓氏命名，被统称为经典交流电桥。受限于组成桥路所用标准元器件的准确度，经典交流电桥的测量误差不易降低到 1×10^{-4} 以下。常见的经典交流电桥如表所示。

常见的经典交流电桥

类型	桥路结构	说明	平衡方程式	注
万用交流电桥	R_A R_B S Z_3 x y Z_4 R_C 电源	用于比较同性质的阻抗，例如被测阻抗 $\underline{Z}_4=R_4+jX_4$，则接在 $\underline{Z}_3$ 处的标准元件必须与 $\underline{Z}_4$ 有相同性质，即 $\underline{Z}_4$ 为容性的，$\underline{Z}_3$ 也须为容性的，$\underline{Z}_4$ 为感性的，$\underline{Z}_3$ 也应是感性的，方能使电桥达到平衡	设被测为电感，即 $\underline{Z}_4=R_4+j\omega L_4$，则必须 $\underline{Z}_3=R_3+j\omega L_3$，如此有 $L_4=(R_B/R_A)L_3$，$R_4=(R_B/R_A)(R_3+R_C)$，此公式假定开关 S 在 y 处 设被测为电容，即 $\underline{Z}_4=R_4+\frac{1}{j\omega C_4}$，则必须 $\underline{Z}_3=R_3+\frac{1}{j\omega C_3}$，如此 $C_4=(R_A/R_B)C_3$，$R_4=(R_B/R_A)(R_3+R_C)$	平衡条件与电源频率无关
麦克斯韦-维恩电桥	L_1 R_1 R_2 C_4 R_3 R_4 电源	简称麦克斯韦电桥，主要用于以电容器为标准来测电感线圈，即在桥路中，R_1、L_1 为待测量，其他元器件都是标准元器件。也能以电感线圈为标准来测电容器	设被测为线圈的电感 L_1，其电阻为 R_1，达到平衡时有 $L_1=R_2R_3R_4$ $R_1=\frac{R_2R_3}{R_4}$ 电感线圈的品质因数 $Q=\frac{\omega L_1}{R_1}=\omega C_4R_4$	平衡条件与电源频率无关
海氏电桥	L_1 R_1 R_2 C_4 R_3 R_4 电源	与麦克斯韦电桥的区别在于：$\underline{Z}_4$ 臂由 C_4、R_4 并联改为串联。也主要用于以电容器为标准测电感，特别是测量带铁芯的电感，从而确定出铁芯的磁导率和铁芯损耗	设被测线圈的电感 L_1 及代表电感线圈铜损和铁芯损耗的电阻是 R_1，平衡时有 $L_1=R_2R_3\frac{C_4}{1+(\omega C_4R_4)^2}$ $R_1=R_3R_4\frac{R_2(\omega C_4)^2}{1+(\omega C_4R_4)^2}$ 电感线圈的品质因数 $Q=\frac{1}{\omega C_4R_4}$ 如 $Q\gg10$，则有 $L_1=R_2R_3C_4$，$R_1=\frac{R_2R_3}{R_4}$	平衡条件与电源频率有关
欧文电桥	L_1 R_1 R_2 C_3 R_3 C_4 电源	也用于测电感	设被测为 L_1 与 R_1，平衡时有 $L_1=R_2R_3R_4$，$R_1=\frac{C_4}{C_3}R_2$	平衡条件与电源频率无关

续表

类型	桥路结构	说明	平衡方程式	注
西林电桥	L_1；C_2, R_2；R_1；C_3；C_4；R_3；电源	主要用于研究电介质材料的性质，特别是在高电压下的电介质损耗因数等	被测电容器的电容为 C_2，其损耗以串联电阻 R_2 表示。平衡时有 $C_2=\frac{R_3}{R_1}C_4$，$R_2=\frac{R_1}{C_4}C_3$ C_2 的损耗角 δ 的正切为 $\tan\delta_{C2}=\omega C_2R_2=\omega R_3C_3$ $\omega=2\pi f$，f 为电源频率。δ_{C2} 很小时 $\tan\delta_{C2}\approx\delta_{C2}$	平衡条件与电源频率无关
谐振电桥	L_1；C_1；R_1；R_2；R_3；R_4；f；电源	主要用于测电源频率。调 C_1 或 L_1 使电桥谐振于电源频率，此时桥路四臂均具有纯电阻性质，调节一个电阻臂如 R_3，可使电桥平衡。频率测量范围由十几赫到几十千赫 基于谐振原理，此桥路也可用于以 C_1 为标准测 L_1，或以 L_1 为标准测 C_1	电桥谐振于电源频率 f 时，有 $f=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$ 如已知 f 及 C_1 时 $L_1=\frac{1}{(2\pi f)^2C_1}$ 如已知 f 及 L_1 时 $C_1=\frac{1}{(2\pi f)^2L_1}$	平衡条件与电源频率有关


图 2　AMSB-30 全自动高压电桥

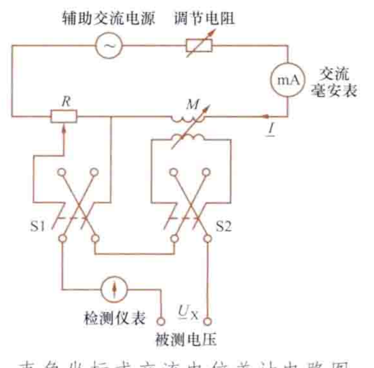
大部分经典交流电桥被逐渐发展起来的如感应耦合比例臂电桥、有源电桥、数字电桥等代替。图 2 所示为全自动高压电桥。

jiaoliu dianweichaji

交流电位差计　(AC potentiometer)　利用补偿原理制成的测量正弦交流电压的幅值、相角或将其分解为两正交分量的仪器。使用频率范围约从工频到超音频；电压幅值范围一般为若干毫伏至若干伏。为扩展电压幅值测量范围需采用分压器。测量交流电流时，要将该电流变换为电压，一般使用标准电阻器，测出电压后，再经欧姆定律换算出被测电流值。具体有直角坐标式和极坐标式两种。

直角坐标式交流电位差计　原理电路如图所示。工作时，电位差计提供两个正交的可变标准电压，当检测仪表指零时，两正交标准电压组成的相量与被测电压相量 $\underline{U}_X$ 完全相等。因此，两正交标准电压的示值，就是 $\underline{U}_X$ 两正交分量的量值。

直角坐标式交流电位差计的主要部分为一个三端可变电阻器 R 和一个可变互感器 M。由辅助交流电源经调节电阻、交流毫安表向 R 与 M 串联的电路提供准确且稳定的电流 $\underline{I}$。它的量值由毫安表监视。标准电压的两正交分量，一个取自可变电阻 R，一个取自可变互感 M。调节 R 上滑动端的位置和 M 的大小，就可改变两正交电压分量的大小。利用开关 S1 和 S2 可将此两电压分量的相位或极性倒反。



直角坐标式交流电位差计电路图

为使两电压完全相等，它们必须具有相同的频率、波形、量值和相位。要满足这些条件，辅助电源电压与被测电压必须为同频率的正弦电压。

受限于交流毫安表的准确度，这种交流电位差计的准确级最高约为 0.5～0.1 级。

极坐标式交流电位差计　工作时，该电位差计提供一个幅值和相位均可改变的正弦标准电压，当检测仪表指零时，标准电压与被测电压 $\underline{U}_X$ 完全相等，即标准电压的幅值和相位就是 $\underline{U}_X$ 的幅值和相位。标准正弦电压的相位可用移相器来改变，其可变幅值取自连接在移相器输出处的三端电阻器上的滑动触点。

交流电位差计的特点是，工作在完全补偿情况下，不从被测电路取电流，即不会使被测电路发生变化，因此降低了测量误差。

jiaoliu gaodianya celiang

交流高电压测量　(measurement of high alternating voltage)　见高电压测量。

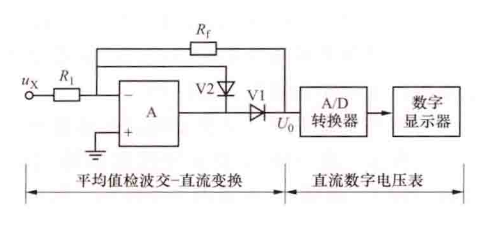
jiaoliu shuzi dianyabiao

交流数字电压表　(AC digital voltmeter)　应用模数转换技术，测量交流电压并以数字显示的电表。由直流数字电压表及交-直流转换器构成。按转换原理的不同，可分为平均值转换、有效值转换和峰值转换器。广泛使用的交流数字电压表多采用平均值转换器，它将交流电压半周期内的平均值或全周期内绝对值的平均值转换成直流电压，按直流电压进行测量，然后再按有效值标度。基于这种转换原理的电压表，要求被测交流电压必须是正弦的，否则将引起原理性测量误差。

采用线性检波原理实现平均值转换的交流数字电压表原理框图如图所示。这种电压表的交-直流转换器的变换准确度高，线性度好，频率范围宽，且动态特性好。

实现有效值转换的方法有热偶法、模拟运算法、采样计

算法等。采用有效值转换器的电压表的测量准确度受输入正弦信号波形畸变的影响很小，被称为真有效值数字电压表，因而有更大的实用价值。



交流数字电压表原理框图

jiao'er

焦耳 (joule)　国际单位制（SI）中能量、热量、功等量的单位。焦耳简称焦，符号是 J。以 1N 的力作用于物体上，并使它沿力的方向位移 1m，该力所做的功定义为 1J。

Jiao'er dinglü

焦耳定律 (Joule's law)　表达导体中通过的电流与由此而产生的热量之间关系的法则。1840 年英国物理学家 J. P. 焦耳（J. P. Joule，1818—1889）通过实验测量总结得出。电流流过金属时，内部的自由电子与正离子晶格不断相互作用，运动的自由电子的动能传递给离子晶格使之作无规则的振动而发热。这一过程实质上是电能转换为导体内能的过程。焦耳定律的数学表达式是

$$Q = I^2Rt$$

式中 Q 是电流通过导体时产生的热量（称为焦耳热）；I 为导体中通过的电流；R 为导体的电阻；t 为通电时间。设 P 为导体通过电流时单位时间产生的热量，即热功率 $P=Q/t$，从而焦耳定律也可写成

$$P = I^2R$$

焦耳热的产生是不可逆的。通常电能转变成热能后，通过周围的介质散失。焦耳定律的适用范围不仅限于金属导体，只要有传导电流存在，均伴随有热量转换的现象。

在导体中，$\boldsymbol{J}=\gamma\boldsymbol{E}$，$\boldsymbol{J}$ 为导体中的电流密度，$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，γ 为导体的电导率。导体单位体积的功率即功率密度 $p=\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{J}=\gamma E^2=J^2/\gamma$，这一公式是焦耳定律的微分形式。

jieyue xiangying

阶跃响应 (step response)　在只含一个激励的线性电路或线性系统中，激励是单位阶跃函数时的零状态响应。因此，阶跃响应是一种特殊激励下的零状态响应。若电路或系统的阶跃激励数不止一个，可以分别考虑各激励单独作用时的阶跃响应。

单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$　它的定义是

$$\varepsilon(t)=\begin{cases}1, t>0\\0, t<0\end{cases}$$

$\varepsilon(t)$ 的时间平移 $\varepsilon(t-\tau)$ 的定义是

$$\varepsilon(t-\tau)=\begin{cases}1, t>\tau\\0, t<\tau\end{cases}$$

式中 τ 为常数。图 1、图 2 分别是 $\varepsilon(t)$ 和 $\varepsilon(t-\tau)$ 的波形。若常数 $\alpha\neq1$，则 $\alpha\varepsilon(t-\tau)$ 是一般的阶跃函数，$t>\tau$ 时，其值恒为 α。

阶跃响应举例　图 3 是电阻 R 和电容 C 串联接到电压源的电路图。电源电压 $u_S(t)$ 是激励，以电容电压 $u_C(t)$ 为输出。当 $u_S(t)=\varepsilon(t)$ 时，所求得的 $u_C(t)$ 的零状态解就是阶跃响应，记作 $s(t)$，即

$$s(t)=u_C(t)=(1-e^{-\frac{t}{RC}})\varepsilon(t)$$

阶跃响应 $s(t)$ 的波形见图 4。

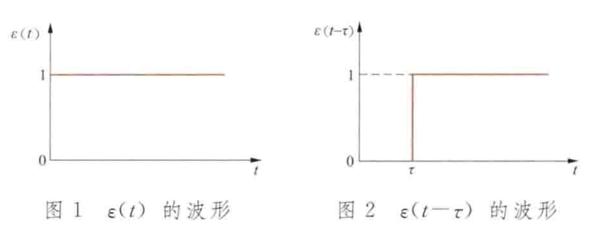


图 1　$\varepsilon(t)$ 的波形　　图 2　$\varepsilon(t-\tau)$ 的波形

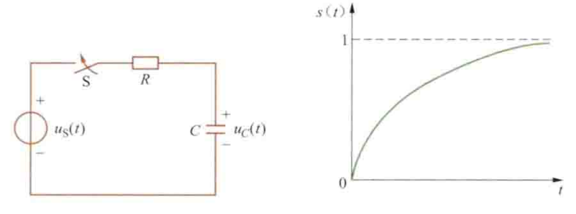


图 3　RC 串联电路图　　图 4　阶跃响应 $s(t)$ 的波形

阶跃响应的应用　$t>0$ 时，若激励是连续的时间函数 $u_S(t)$，可以近似地把它当作许多阶跃函数的叠加，见图 5。图中，注明 1 的部分代表 $\alpha_0\varepsilon(t)$，注明 2 的部分代表 $\alpha_1\varepsilon(t-\tau_1)$，其他部分的意义类似。则

$$u_S(t)\approx\alpha_0\varepsilon(t)+\alpha_1\varepsilon(t-\tau_1)+\cdots$$

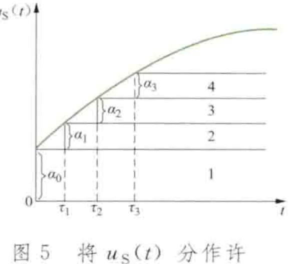


图 5　将 $u_S(t)$ 分作许多阶跃函数

对应于每个阶跃函数均可求得电路或系统的阶跃响应。将这些响应叠加，就得到了近似的零状态响应 $y(t)$，即

$$y(t)\approx\alpha_0s(t)+\alpha_1s(t-\tau_1)+\cdots$$

jiedianfa

节点法 (node analysis)　用电路中节点电压为待求量求解电路问题的方法。在连通电路中任选一节点为参考节点，其他节点与参考节点间的电压称为节点电压。设电路中节点数为 $n+1$，则节点电压数和节点法方程数等于独立节点数 n。这种方法常用于分析节点少而支路多的复杂电路。因节点电压容易选定，在用计算机辅助分析大型网络时，一般多采用节点法。

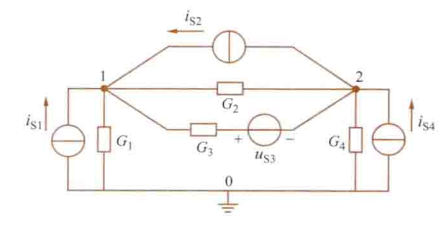


图 1　线性电阻电路

节点法的方程可用系统化的方法直接列出。图 1 所示不含受控源的线性电阻电路中，独立节点数 $n-1=2$，节点 1

和 2 的节点电压以u_1和u_2表示，G_k为支路电导，u_{Sk}为电压源的电压，i_{Sk}为电流源的电流。应用电源的等效变换将电压源用它的等效电流源代替（见图 2），电路的节点法方程可表示为

$$节点1\quad G_{11}u_1+G_{12}u_2=i_{S11}$$
$$节点2\quad G_{21}u_1+G_{22}u_2=i_{S22}$$

式中G_{jj}称为节点j的自电导，它等于和节点j相连各支路的电导之和，恒为正。本例中$G_{11}=G_1+G_2+G_3$，$G_{22}=G_2+G_3+G_4$；G_{jk}（$j\neq k$）称为节点j和节点k之间的互电导，它等于连接在节点j和节点k之间的各支路的电导之和并冠于负号。本例中$G_{12}=G_{21}=-(G_2+G_3)$。i_{Sjj}等于流入节点j的各电流源（包括等效电流源）电流的代数和。凡是参考方向指向节点j的电流取正号，背离节点j的电流取负号。本例中$i_{S11}=i_{S1}+i_{S2}+G_3u_{S3}$，$i_{S22}=-i_{S2}+i_{S4}-G_3u_{S3}$。对于有$n+1$个节点的电阻电路，节点法方程可系统化地表示为

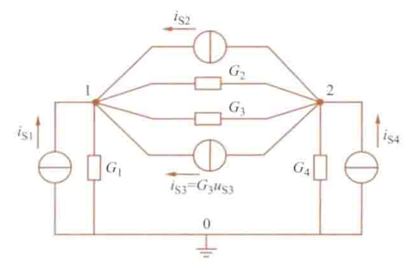


图 2　用等效电流源替代电压源

$$\left.\begin{aligned}G_{11}u_1+G_{12}u_2+G_{13}u_3+\cdots+G_{1n}u_n=i_{S11}\\G_{21}u_1+G_{22}u_2+G_{23}u_3+\cdots+G_{2n}u_n=i_{S22}\\\cdots\\G_{n1}u_1+G_{n2}u_2+G_{n3}u_3+\cdots+G_{nn}u_n=i_{Snn}\end{aligned}\right\}$$

含定常R、L、C元件的正弦电流稳态电路中，节点法方程可表示为

$$\left.\begin{aligned}\underline{Y}_{11}\underline{U}_1+\underline{Y}_{12}\underline{U}_2+\cdots+\underline{Y}_{1n}\underline{U}_n=\underline{I}_{S11}\\\underline{Y}_{21}\underline{U}_1+\underline{Y}_{22}\underline{U}_2+\cdots+\underline{Y}_{2n}\underline{U}_n=\underline{I}_{S22}\\\cdots\\\underline{Y}_{n1}\underline{U}_1+\underline{Y}_{n2}\underline{U}_2+\cdots+\underline{Y}_{nn}\underline{U}_n=\underline{I}_{Snn}\end{aligned}\right\}$$

式中$\underline{Y}_{jj}$、$\underline{Y}_{jk}$为相应的复数自导纳和互导纳；$\underline{U}_j$为节点电压相量；$\underline{I}_{Sjj}$为流入节点j电流源的各电流的相量和。上述方程也可用矩阵形式表示为

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\underline{Y}_{11}&\underline{Y}_{12}&\cdots&\underline{Y}_{1n}\\\underline{Y}_{21}&\underline{Y}_{22}&\cdots&\underline{Y}_{2n}\\\cdots&\cdots&\cdots&\cdots\\\underline{Y}_{n1}&\underline{Y}_{n1}&\cdots&\underline{Y}_{nn}\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{Y}}\underbrace{\begin{bmatrix}\underline{U}_1\\\underline{U}_2\\\cdots\\\underline{U}_n\end{bmatrix}}_{\underline{\boldsymbol{U}}}=\underbrace{\begin{bmatrix}\underline{I}_{S11}\\\underline{I}_{S22}\\\cdots\\\underline{I}_{Snn}\end{bmatrix}}_{\underline{\boldsymbol{I}}_S}$$

式中系数矩阵$\boldsymbol{Y}$称为节点导纳矩阵。当电路中不含受控源时，节点导纳矩阵为对称矩阵，即$\underline{Y}_{jk}=\underline{Y}_{kj}$；否则为不对称矩阵。

由节点法方程解出节点电压后，可进一步求出各支路电流或电压。

jiexing changxiaoying jingtiguan

结型场效应晶体管　(junction field effect transistor)

利用半导体 PN 结反向偏置条件下的电场效应进行工作的场效应半导体器件。其特点是栅源间的电阻高，可以达到$10^7\,\Omega$以上，它是电压控制器件，所需控制电流极微，且受温度、辐射等外界条件影响小，广泛应用于放大电路和开关电路中，也可作为压控电阻使用。

结构和工作原理　结型场效应晶体管的结构示意图如图 1（a）所示。在一块 N 型半导体材料两边扩散高浓度的 P 型区（用P^+表示），形成两个 PN 结。从两边P^+型区引出两个欧姆接触电极并连在一起称为栅极 g，在 N 型本体材料的两端各引出一个电极，分别称为源极 s 和漏极 d。中间的 N 型区是载流子通过漏、源两极的通路，称为导电沟道。具有这种结构的结型场效应晶体管称为 N 沟道管，图 1（b）是它的图形符号。还有一种与它对偶的结构形式称为 P 沟道管，它的图形符号，栅极箭头应向外。沟道的上下两侧与栅极分别形成 PN 结，改变加在 PN 结两端的反向偏置电压，就可以改变导电沟道的宽度，实现以改变栅源电压u_{GS}来控制电流i_D的目的。u_{GS}值越负，导电沟道越窄，当u_{GS}加大到一定值时，导电沟道被夹断，$i_D\approx0$，此时的u_{GS}称为夹断电压$U_{GS(off)}$。

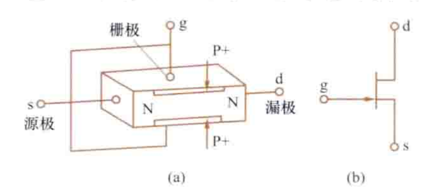


图 1　N 沟道结型场效应晶体管
（a）结构示意图；（b）图形符号

特性曲线　当u_{DS}一定时，u_{GS}和i_D之间的关系称为转移特性，见图 2。在$U_{GS(off)}\leqslant u_{GS}\leqslant0$范围内，$i_D$随$u_{GS}$的增加（负值减少）近似按平方律上升，故有

$$i_D=I_{DSS}\left[1-\frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right]^2$$

式中I_{DSS}称为饱和漏极电流。此特性常被用来作为混频调制和检波。转移特性上工作点的斜率，称为跨导g_m，它是表征结型场效应晶体管放大能力的一个重要参数，单位为毫西（mS）。此外，尚有漏极特性（亦称输出特性），它描述以u_{GS}为参变量时，i_D和u_{DS}之间的关系，见图 3。从图中可见，管子的工作状态可以分成三个区：①可变电阻区。该区的特点是u_{DS}较小，i_D几乎与u_{DS}呈线性关系增加。增加的比值由u_{GS}控制。此时结型场效应晶体管的 d、s 之间可以看成一个由电压u_{GS}控制的可变电阻。②恒流区（也称饱和区）。曲线近似水平的部分是恒流区，u_{DS}较大。该区的特点是i_D的大小受u_{GS}控制，而当u_{DS}增大时，i_D只略有增加，因而可以把i_D近似看成为一个受u_{GS}控制的电流源。③夹断区。当$u_{GS}<U_{GS(off)}$时，沟道被夹断，$i_D\approx0$，这个区域称为夹断区。

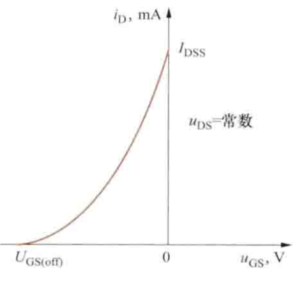


图 2　转移特性

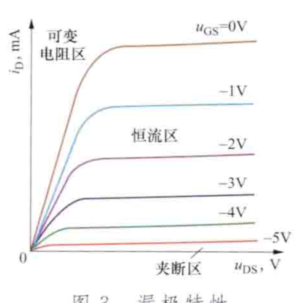


图 3　漏极特性

结型场效应晶体管的外特性与耗尽型绝缘栅场效应晶体管类似。

主要电参数　结型场效

应晶体管的主要电参数与耗尽型 MOS 管相同，详见绝缘栅场效应晶体管。

jietiaoqi

解调器 (demodulator) 实现由已调制信号中恢复原来的调制信号的电子电路。已调制信号有三种：已调幅信号、已调频信号和已调相信号，与之对应的有振幅解调器、频率解调器和相位解调器三种。解调器在通信、信号处理和自动控制系统中得到广泛应用。

振幅解调器 从已调幅的载波信号中恢复原来的调制信号的电路。图 1 为振幅解调器的原理框图。图中 $u_x(t)=U_x\cos(\omega_c-\omega_m)t$ 为平衡调幅器输出的下边频信号（见调制器）；$u_y(t)=U_y\cos\omega_c t$ 为载波信号，且 $\omega_c\gg\omega_m$。电路由模拟乘法器和低通滤波器两部分组成。模拟乘法器的输出电压为，$u'_o(t)=\frac{1}{2}KU_xU_y[\cos(2\omega_c-\omega_m)t+\cos\omega_m t]$，式中 K 为模拟乘法器的增益系数。低通滤波器的输出电压为 $u_o(t)=\frac{1}{2}KU_xU_y\cos\omega_m t$，即已调制信号中的原始信号。低通滤波器的上限截止角频率 ω_h 应满足：$\omega_m<\omega_h<(2\omega_c-\omega_m)$。如果图 1 中 $u_x(t)$ 是包含多个频率分量的下边带信号，则 $u_y(t)$ 仍是载波信号，即 $u_y(t)=U_y\cos\omega_c t$，低通滤波器的上限截止频率应等于原始调制信号中的最高频率。除图 1 所示的利用乘法器的电路外，还有多种振幅解调电路，如二极管解调电路，又称二极管检波电路。

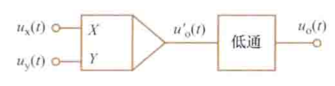


图 1 单一频率的振幅解调框图

频率解调器 从已调频的载波信号中恢复原来的调制信号的电路。因已调频波的信息包含在高频振荡的频率变化之中，所以，要解调出原来的调制信号，就必须用频率检波。频率检波又称鉴频。对鉴频器的要求是输出信号应与输入的调频波的瞬时频率的变化呈线性关系。比较普遍应用的方法是：先将等幅调频波变换成幅度随瞬时频率变化的调频波，然后，用振幅检波器将幅度的变化检测出来，其波形变换如图 2 所示。图中 $u_{Fm}(t)$ 为等幅调频波；$u_{Am}(t)$ 为幅度随瞬时频率变化的调频波；$u_m(t)$ 为调制信号，它反映 $u_{Am}(t)$ 的振幅变化。图 3 是按上述原理设计的相位鉴频器原理电路。图中一次回路中的 C_1L_1 和二次回路中的 L_2C_2 均调谐于调频波的中心频率 f_0，完成波形变换的任务，即把等幅的调频波变换成幅度随瞬时频率变化的调频波 $u_{Am}(t)$，V1、R、C_3、V2、R、C_3 组成上下两个振幅检波器，以检测振幅的变化。

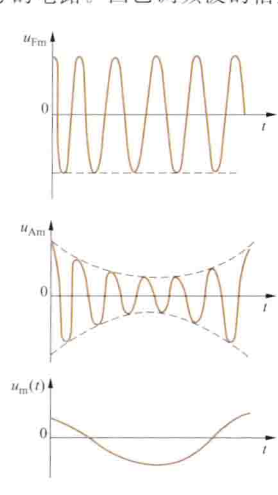


图 2 利用波形变换电路进行鉴频的原理图

相位解调器 从已调相的载波信号中恢复原来的调制信号的电路。因为调相波是等幅的高频振荡波，信息是包含在等幅的高频振荡波的相位变化之中，所以，要从调相波中取出原来的调制信号，必须采用相位检波又称鉴相。鉴相电路有多种，应用模拟乘法器的鉴相器得到广泛应用。它在通信、锁相环、频率合成等技术领域中用得较多，其方框图如图 4 所示。

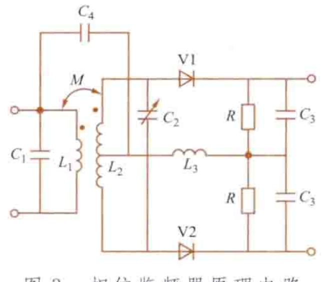


图 3 相位鉴频器原理电路

设 $u_1(t)$ 为调相电压，$u_2(t)$ 为基准电压，且 $u_1(t)=U_{1m}\cos[\omega_c t+\varphi_1(t)]$，$u_2(t)=U_{2m}\cos[\omega_c t+\varphi_2(t)]$，式中 ω_c 为载波频率。信息隐含在 $\varphi_1(t)-\varphi_2(t)$ 的瞬时相位变化中，由图 4 得模拟乘法器的输出电压为

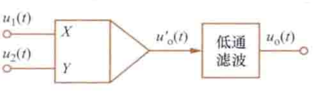


图 4 采用模拟乘法器的鉴相电路方框图

$$u'_o(t)=Ku_1(t)u_2(t)=\frac{1}{2}KU_{1m}U_{2m}\cos[\varphi_1(t)-\varphi_2(t)]$$

$$+\frac{1}{2}KU_{1m}U_{2m}\cos[2\omega_c t+\varphi_1(t)+\varphi_2(t)]$$

经低通滤波器后的输出电压为

$$u_o(t)=\frac{1}{2}KU_{1m}U_{2m}\cos[\varphi_1(t)-\varphi_2(t)]$$

jieshi chengxu

解释程序 (interpreter) 按照源程序语句的动态执行顺序，逐句地进行解释而后立即执行的翻译程序。解释程序主要包含词法分析、总控程序和一组各种类型语句的执行子程序，由总控程序来控制其执行。总控程序完成语句的语法检查、判别不同的语句，转相应的执行子程序等任务。语法有错时输出错误信息。执行子程序按语句的语义执行相应的动作。解释程序不产生目标程序。通常，它比编译程序花费的机器时间较多，但存储空间占用较少。

解释程序的优点：结构简单，易于实现，能方便地进行程序调度和修改，可进行人机对话，适于交互式会话方式下的程序编制和执行等。缺点：执行效率低，例如重复执行的语句，采用解释程序执行时，这些语句的每次动态执行都要解释，而使用编译程序只需翻译一次；高级程序设计语言中的某些结构以及优化措施是解释程序难以实现的。

解释程序主要用于：①交互式会话语言，比较常见的有 BASIC、APL 以及各种命令式语言；②作程序调试用。程序设计语言可同时配置两个翻译程序：解释程序和编译程序。利用前者的特点进行程序调试和修改，编译程序则在实际运行中使用；③提高运行效率。有些语言中的大多数语句（字符串加工语言中的字符串查找语句和加工语句等），其执行时间要比翻译时间长得多，此时采用解释程序比较合适。

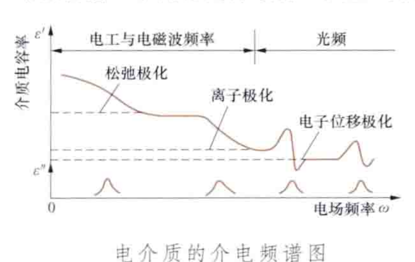
jiedian sesan yu xishou

介电色散与吸收 (dielectric dispersion and absorption) 电介质的光折射率随入射光频率而发生变化的现象。在光频范围内，电介质中能够发生的极化主要有离子极化与电

子极化两类。随入射光波电矢量的快速周期性变化，电介质中荷电粒子的极化运动具有高频振动的性质，因而必然产生能量辐射，使荷电粒子的高频振动成为阻尼振动，引起入射光能量损耗，宏观表现为光吸收，这是与介电色散必然同时存在的物理过程。

介电色散与吸收也可用复电容率（或复折射率）来表示，其实部是光频电容率，虚部表示光吸收。

将介电色散与吸收扩大到全频率范围，便得到介电色谱与吸收谱，常简称为介电谱。典型的极性电介质的介电频谱如图所示，它包括电工、无线电频率范围的各种极化与损耗和光频范围的介电色散与吸收。不同组成和结构的电介质，有不同的介电谱，因而介电谱是研究电介质性能与组成、结构关系的一种重要工具。



电介质的介电频谱图

jiezhi sunhaojiao zhengqie celiang

介质损耗角正切测量

(dielectric loss factor measurement) 见电容率与损耗因数试验。

jinshu daodian jili

金属导电机理

(mechanism of metal conduction) 电场作用下金属中自由电子导电的规律和本质。

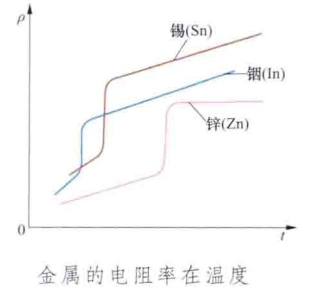
主要特性　与非金属固体、液体或气体导电相比，金属导电有如下特征：电阻率随温度增高而上升，电阻率随材料所含杂质数量和种类而变，电阻率随材料内部应变而变。

(1) 电阻率随温度增高而上升，在相当宽的温度范围内呈线性关系

$$\rho_t = \rho_0[1+\alpha(t-t_0)] \tag{1}$$

式中 ρ_t 为温度 t(℃) 下金属的电阻率；ρ_0 为同一金属在标准测试温度 t_0 下的电阻率。通常取 $t_0=0$℃，也可取 $t_0=20$℃。对于水银，则取 $t_0=-45$℃。α 是温度每升高 1℃，电阻率的增量，称为电阻率的温度系数。良导体的电阻率为 $10^{-8}\Omega\cdot m$ 数量级，非良导体可能大几倍至几十倍。电阻率的温度系数一般是 10^{-3}℃$^{-1}$ 数量级，特殊的合金例外。

在接近熔点时，由于金属的电阻率发生突然变化，上式不适用（见图）；此外，在低温场合，即当温度远低于金属的德拜温度（可从物理手册中查得）时，上式也不适用。



金属的电阻率在温度接近熔点时发生突变

(2) 金属的电阻率随所含杂质的数量和种类而变。含杂质的金属导体的电阻率大于纯金属导体的电阻率。因此电热丝必须是合金材料。

(3) 当材料承受拉伸或压缩产生形变时，或由于其他原因，如热处理等，内部产生应力时，其电阻率亦将发生改变。

物理模型　正确的金属导电理论应能解释上述三个特征。在金属中，携带电荷的载流子是电子。构成金属晶格的正离子只能在其平衡位置附近作振动。在电场力的作用下，电子的定向迁移形成电流。金属中的电子在相对于自身体积来说很宽敞的晶格点阵间隙中运动，类似于气体分子的热运动，因此可称为电子气。无电场时，其运动是杂乱无序的，即自由电子的热运动。有电场时，电场力的作用使自由电子除热运动外，还有一个沿着电场反方向移动的定向运动分量，从而形成宏观的电流。

金属中自由电子的微观运动不断地改变方向，主要原因是和晶格离子发生碰撞。因为离子的体积比电子大得多，所以，这种碰撞的几率比较大。每碰撞一次，电子便改变运动方向，此现象称为晶格散射。金属导体的导电性正是取决于这种散射。随着温度的升高，电子热运动和晶格振动都加剧，电子被晶格散射的概率增大，因此电阻率增大。这便解释了金属电阻率随温度升高而增大的物理现象。当金属中含有杂质时，金属晶格中的填隙原子和缺陷数目增加，电子被晶格离子、填隙原子及缺陷散射的概率增加，造成电阻率增大。此外，当金属受到外力作用时，应力引起的应变使晶格发生畸变，也导致电阻率改变。上述金属导电的电子理论能够解释金属导电三大特征。

经典理论　依照上述物理模型，用经典电动力学的方法可推导出电导率公式，如以 σ 表示金属的电导率，则有

$$\sigma = \frac{ne^2}{m}\tau \tag{2}$$

式中 n 为电子气的密度（单位体积内的自由电子数目），m 为电子质量，e 为电子电荷，τ 为平均自由时间。平均自由时间的定义是每二次碰撞间历经的时间的平均值。

量子理论　经典理论的缺点是不能导出金属电阻率与温度成正比的定量关系。原因是未考虑量子效应。按照量子力学理论，晶格的周期性势场产生能带，在能带中电子的每一个本征态以波矢 k 表示。在严格的周期性势场中，电子保持在一个本征态上，并不随时间改变，这相当于电子不被晶格所散射，即具有无限长的平均自由程。实际上，由于晶格振动、缺陷等因素破坏了晶格势场的严格周期性，导致电子平均自由程的缩短。

在量子论中，和经典麦克斯韦速率分布相对应的是电子气的平衡态费米统计分布，用 $f(E)$ 来表示，其中能量 E 是波矢 k 的函数，即 $E=E(k)$。在外电场 $\vec{\varepsilon}$ 的作用下，电子的状态随时间而改变，有关系式

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{e\vec{\varepsilon}}{h} \tag{3}$$

式中 h 是普朗克常数。

电子的状态改变是由散射引起，即电子和晶格碰撞后波矢 k 改变，从而使分布函数改变了 $\Delta f = f - f_0$，碰撞后又逐步恢复平衡状态，可用松弛时间 τ 来描述恢复平衡的速度，即 $\Delta f = (\Delta f)_{t=0}\,e^{-t/\tau}$。用量子统计力学的方法可以导出形式上与经典公式相同的结果，即

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m^*} \tag{4}$$

式中 τ 是松弛时间而不是平均碰撞时间，m^* 是电子的有效质量而不是惯性质量。在各向同性的介质中，有效质量的定义是

$$m^* = \frac{h^2}{\dfrac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2}} \tag{5}$$

可见，m^* 是一个和能带结构及电子在能带中分布状况有关的量，因而是一个与晶格的周期性结构以及电子、晶格相互作用有关的量。

尽管在引入松弛时间和有效质量后，量子论的电导公式与经典公式相似，但在量子论中可以通过计算散射截面来求得松弛时间 τ 与温度的关系。对纯金属来说，当温度高于德拜温度时，可以证明 $\tau \propto T^{-1}$，即 $\rho \propto T$。而当温度远低于德拜温度时，则可以证明 $\rho \propto T^5$。这一计算结果和布洛赫-格林爱森经验公式相吻合。

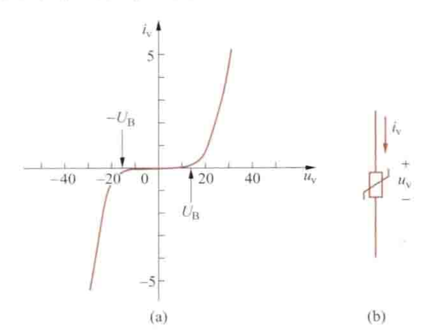
在有杂质的情况下，按照马西森定则，固溶体的电阻率应是纯金属晶格散射及杂质散射两部分引起的电阻率之和。量子论可以计算出由杂质散射引起的附加电阻率与有效质量有关，但与温度无直接联系。

松弛时间与有效质量有关，实质上是反映电阻率与金属能带结构有关。通过计算能级密度还可以解释过渡金属电阻率的一些异常情况，这些都是经典理论无法解释的。

jinshuyanghuawu bianzuqi

金属氧化物变阻器

(metaloxide varistor，MOV) 具有与电压极性无关的非线性伏安特性的一种压敏电阻器。金属氧化物变阻器的典型 U-I 特性和图形符号如图所示。金属氧化物变阻器的击穿电压可以高达 1000V，也可低至 15V，常用于电力和电动机控制系统中。它进入正、反两方向击穿所需的时间很短。因此，它是一种理想的瞬时电冲击保护器件，如防雷设备中的应用即是一例。



金属氧化物变阻器的特性和图形符号

(a) U-I 特性；(b) 图形符号

jindai kuandu

禁带宽度

(width of forbidden band) 导带的能量下边界和价带的能量上边界之间的间隙。根据能带理论，固体中运动电子的能量谱值系由一系列准连续的具有一定宽度的能带（称为允带）所组成。两个相邻的允带之间的区域为不能被电子占据的能量禁区，称为禁带。禁带所覆盖的能量区间即为禁带宽度，用E_g表示。在室温下，半导体材料锗、硅、砷化镓的禁带宽度依次为 0.67eV、1.12eV 和 1.428eV。

禁带宽度E_g随温度 T 的变化关系为

$$E_g = E_g(0) + \beta T \quad (1)$$

$$\beta = dE_g/dT \quad (2)$$

式中 $E_g(0)$ 为外推至 T=0K 时的禁带宽度。锗、硅、砷化镓的 $E_g(0)$ 依次为 0.785、1.21、1.53eV。将上两式代入本征载流子浓度公式中（见载流子），则本征载流子浓度n_i为

$$n_i = 4.82 \times 10^{15} \left(\frac{m_p^* m_n^*}{m_0^2}\right)^{3/4} \times T^{3/2} \times \exp\left(-\frac{\beta}{2k}\right) \exp\left[-\frac{E_g(0)}{2kT}\right] \quad (3)$$

由式 (3) 可知，半导体材料的禁带宽度对本征载流子浓度有影响。对一定的半导体材料，其本征载流子浓度随温度的升高而迅速增加。对不同的半导体材料，在一定温度下，禁带宽度E_g愈大，本征载流子浓度n_i就愈小。

二极管 PN 结的反向饱和电流密度与 n_i^2 成比例。因此，E_g愈大，n_i随温度的变化也愈大，反向饱和电流变化就愈快，这一性质将影响半导体器件的温度特性。

jingdian kongzhi lilun

经典控制理论

(classical control theory) 采用传递函数和频率特性描述，研究单输入单输出控制系统的控制理论，亦称古典控制理论。它是自动控制理论的一个组成部分。

设计和建立自动控制系统以代替或部分代替人的部分体力、脑力劳动的努力可以追溯到人类的古代文明时期。中国东汉时期建造的指南车被认为是人类历史上最早的“控制论”机械。1788 年 J. 瓦特（J. Watt）发明了蒸汽机的离心式飞摆调速器，构成了近代的自动控制装置。

随着各种自动控制系统的建立，不少学者致力于研究自动控制系统的稳定性等有关的理论问题，并逐步取得了成果。1868 年 J. C. 麦克斯韦（J. C. Maxwell）发表的《论调速器》，总结了无静差调速器的理论；1876 年 И. А. 维什涅格拉茨基（И. А. Вышнеградский）发表的《论调节器的一般理论》进一步总结了调节器的理论；E. J. 劳斯（E. J. Routh）在 1875 年、A. 赫尔维茨（A. Hurwitz）在 1895 年分别独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的判据（见劳斯-赫尔维茨稳定判据）。进入 20 世纪，研究工作又取得了更多的进展，1922 年 H. 米诺尔斯基（H. Минорский）发表了《关于船舶自动操舵的稳定性》；1932 年 H. 奈奎斯特（H. Nyquist）建立了根据频率响应判别系统稳定性的判据（见奈奎斯特稳定判据）；1934 年 H. L. 黑曾（H. L. Hazen）发表了《关于伺服机构理论》；同年，И. Н. 沃兹涅先斯基（И. Н. Вознесенский）发表了《自动调节理论》；1938 年 A. B. 米哈依洛夫（A. B. Михайлов）发表了《频率法》，这些标志着经典控制理论的诞生。1939 年苏联科学院设立自动学和远动学研究所，同年美国麻省理工学院建立伺服机构实验室。这两者是世界上第一批系统与控制的专业研究机构，为 20 世纪 40 年代形成经典控制理论学科和发展局部自动化做了理论和组织上的准备。这一学科当时在美国称为伺服机构（servo mechanism）理论，在苏联称为自动调节原理，主要是研究单变量的线性定常系统控制问题。20 世纪 40～50 年代，经典控制理论的研究取得了重大的进展。1945 年 H. W. 伯德（H. W. Bode）发表了专著《网络分析和反馈放大器设计》。同年，L. A. 麦科尔（L. A. MacColl）发表了第一本关于经典控制理论的专著《伺服机构的基本理论》。1947 年 H. M. 詹姆斯（H. M. James）等三人合著的第一本经典控制理论教材《伺服机构理论》出版。1948 年 N. 维纳（N. Weiner）发表《控制论》，为控制论奠定了基础。同年 C. E. 香农（C. E. Shannon）发表《通信的数学基础》，为信息论奠定了基础。维纳和香农分别从控制和信息两个侧面来研究系统，维纳还从信息的角度研究了反馈系统的本质，从而使人们对反馈和信息有了较深刻的理解。1954 年钱学森发表了《工程控

制论》，全面总结了经典控制理论。上述这一切，标志着经典控制理论的成熟。1960 年在第一届全美联合自动控制会议上，把系统与控制领域中研究单变量控制问题的理论称为经典控制理论，研究多变量控制问题的理论称为现代控制理论。

经典控制理论的主要研究对象是单输入单输出的线性定常控制系统（见线性控制系统）。主要采用传递函数和频率特性描述，反馈是基本控制方式。控制的目的是保持系统稳定性，保持输出为一常量或按一定规律变化以及使系统的动态响应和稳态误差符合要求。研究连续型线性定常控制系统的主要方法是频率响应法，还有根轨迹法。研究离散型线性定常控制系统（见离散控制系统）用 Z 变换法。研究内容有两类：一类是控制系统行为和性能的分析；另一类是控制系统设计与补偿。简单的非线性控制系统也是经典控制理论的研究对象，其研究方法主要有描述函数法和相平面法。

20 世纪 50 年代，空间技术迅速发展，迫切需要解决多变量系统的最优控制问题。学者们试图把经典控制理论推广到多变量系统的控制，都遭到了失败。需要寻求新的理论和方法，于是现代控制理论诞生了。

尽管经典控制理论有其固有的局限性，但在其适用的范围内，它仍然是很有效的，并且使用也简便，因而迄今仍得到广泛应用。

jingtiguan dianyabiao

晶体管电压表

（transistor voltmeter） 由晶体管放大器和指针式电表组成的电压表，又称电子电压表。按量程分类，有伏特表、毫伏表、微伏表；按工作频率分类，有直流、音频、视频、高频、超高频、宽频带、选频或兼有测量直流和交流的复用型电压表等多种；按对信号的检波方式分类，有平均值检波、峰值检波和有效值检波电压表；且还有一种称为脉冲电压表，它采用峰值检波和保持电路来实现对脉冲电压幅值的测量。

晶体管电压表的电路结构一般包括量程转换（分压器）、放大器、检波器、指示器（表头）和电源等功能单元。它的优点是输入阻抗高、量限宽、改变量程方便、频率范围宽和过载能力强；缺点是准确度不高，需定期进行校准。随着数字式电压表的出现及其功能不断增强、技术性能指标不断提高，实际应用中，晶体管电压表已基本被数字式电压表等智能型电表所替代。

jingti zhendangqi

晶体振荡器

（crystal oscillator） 石英晶体作为选频元件的正弦波振荡电路。晶体振荡器按晶体在电路中的接法可分为并联型和串联型两类。在采用恒温控制时，其振荡频率稳定度一般可高达 $10^{-9} \sim 10^{-11}$。在通信及电子设备中晶体振荡器被广泛用作信号源。

石英晶体　利用压电效应制成的一种谐振器件。基本结构是从一块石英晶体上按一定方向切割成薄片，在两个对应表面上涂敷银层作为电极，然后焊上引出线，再用金属或玻璃壳封装而成。当在石英晶体的两个电极上加一电场时，晶片就会产生机械变形。反之，若在晶片的两侧施加机械压力，则在晶片相应的方向上产生电场。这种物理现象称为压电效应。晶片按照切割的情况，有它本身的谐振频率。当在晶片的两个电极上加交变电压时，晶片会产生机械振动，同时晶片的机械振动又会产生交变电场。如果外加频率与晶片的谐振频率相等，则产生压电谐振。这种物理现象可用图 1（b）所示的等效电路来表示。图中 L、C、R 分别为晶体的等效电感、电容和电阻，而 C' 则为晶体两电极间的寄生电容。石英晶体在电路中的图形符号如图 1（a）所示。图 1（c）为石英晶体等效阻抗的频率特性曲线。它具有很高的品质因数 Q。

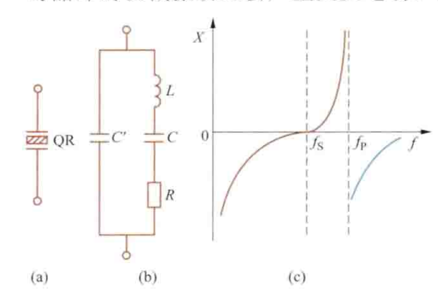


图 1　石英晶体的等效电路及特性曲线
（a）图形符号；（b）等效电路；
（c）阻抗频率特性

石英晶体的谐振频率有两个：

（1）当 L、C、R 支路发生串联谐振时，谐振频率为 $f_S = 1/(2\pi\sqrt{LC})$。若工作频率 $f < f_S$，电路呈容性；$f > f_S$，电路呈感性。

（2）当 L、C、R 支路呈感性，与电容 C' 产生并联谐振时，谐振频率为 $f_P = 1/(2\pi\sqrt{LC_P})$，式中 $C_P = CC'/(C + C')$，通常 $C' \gg C$，因此，$C_P \approx C$，也就是 f_P 甚接近于 f_S。当 $f > f_P$ 时，晶体的等效电路呈容性。

石英晶体产品外壳上所标的频率，一般指并联负载电容（$C_L \approx 30\text{pF}$）时的并联谐振频率。

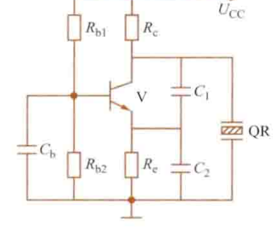


图 2　并联型晶体振荡器

并联型晶体振荡器　利用石英晶体的并联谐振特性构成的振荡电路，如图 2 所示。C_1、C_2 兼起分压作用。整个电路的振荡频率就是晶体的谐振频率。

串联型晶体振荡器　利用石英晶体的串联谐振特性构成的振荡电路，如图 3 所示。当晶体工作在串联谐振 $f = f_S$ 时，晶体的阻抗呈纯电阻特性，且最小。此时电路实现正反馈，且反馈最强，产生自激振荡，振荡频率即为 f_S。

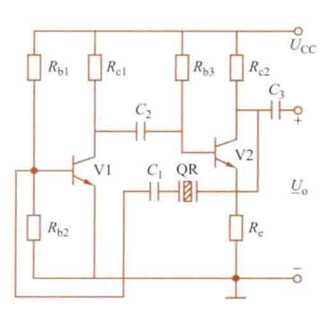


图 3　串联型晶体振荡器

晶体振荡器的连接电路可以多种多样，以上仅为举例说明。

jingzhaguan

晶闸管

（thyristor） 具有三个或多个 PN 结，能从断态转入通态，或从通态转入断态的双稳态电力电子器件，也称晶体闸流管。晶闸管一词是包括所有 PNPN 型开关管族系的泛称术语，在不致引起含混或误解时，它可用来表示晶闸管族系的任何一种器件。

分类　根据晶闸管主电压-电流特性曲线在第Ⅲ象限的状态分类，有：

（1）反向阻断晶闸管。以往称可控硅整流器（silicon controlled rectifier，SCR），现简称为晶闸管。

（2）逆导晶闸管。一种对负阳极电压没有开关作用，而当该电压量级可与通态电压比拟时，能通过大电流的三端晶闸管。

（3）双向晶闸管。一种在主特性的第Ⅰ和第Ⅲ象限内具有基本相同转换性能的三端晶闸管。

以上三种晶闸管的主电压-电流特性曲线如图1所示。

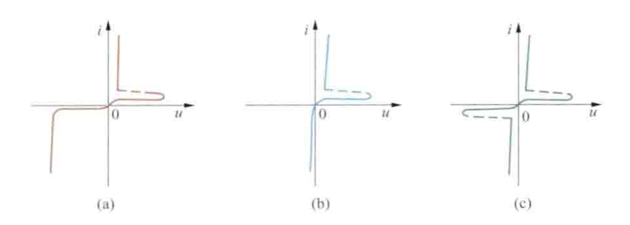


图1　三种类型晶闸管主电压-电流特性曲线

（a）反向阻断晶闸管；（b）逆导晶闸管；（c）双向晶闸管

此外，根据功用的不同，还有：

（1）可关断晶闸管。一种施加适当门极信号，可从通态转换到断态或从断态转换到通态的三端晶闸管，一般简称为GTO（gate turn-off thyristor）。

（2）快速晶闸管。一种对开、关时间等瞬态参数有特别要求，可以在频率高于400Hz工作的反向阻断三端晶闸管。

（3）光控晶闸管。以光信号或光电信号触发使之进入通态的晶闸管。

上述多种功率半导体器件构成了广泛应用于电力电子技术领域中的晶闸管族系。图2所示为晶闸管换流阀。



3英寸电触发晶闸管换流阀



4英寸晶闸管换流阀



5英寸全压接型晶闸管



6英寸全压接型晶闸管



6英寸高压低温焊接型晶闸管

图2　晶闸管换流阀

反向阻断晶闸管工作原理　它是以N型硅单晶为基础材料，通过扩散或合金法形成具有三个结的PNPN四层结构芯片，并有三个端子，即阳极A、阴极K和门极G（图3）。

（1）基本原理：如图4所示，可把晶闸管视为两个晶体管P1N1P2和N1P2N2的再生反馈结，用以说明晶闸管从断态转换为通态或由通态转换为断态的工作原理。J2结成为两个晶体管共同的集电结，令晶体管P1N1P2和N1P2N2的电流放大系数分别为α_P和α_n，J2结的空穴和电子雪崩（见硅稳压二极管）倍增系数分别为M_P和M_n，P1N1P2晶体管的漏电流为I_{L1}，则基极电流i_{B1}可用式（1）表示，即

$$i_{B1}=(1-\alpha_P M_P)i_A-I_{L1} \tag{1}$$

对于N1P2N2晶体管，令漏电流为I_{L2}，则集电极电流i_{C2}可用式（2）表示，即

$$i_{C2}=\alpha_n M_n i_k+I_{L2} \tag{2}$$

因为$i_{B1}=i_{C2}$，$i_k=i_A+i_G$，从式（1）和式（2）得到

$$i_A=\frac{I_{L1}+I_{L2}+\alpha_n M_n i_G}{1-\alpha_P M_P-\alpha_n M_n} \tag{3}$$

当$\alpha_P M_P+\alpha_n M_n=1$时，晶闸管开通。$M_P$、$M_n$是外加电压$u$的函数，当转折电压为$U_{BO}$时可用式（4）表示

$$M=1/\left[1-(U/U_{BO})^n\right] \tag{4}$$

式中对于M_P，$n=4\sim9$；对于M_n，$n=1.4\sim2.5$。α_P、α_n是电流的函数，电流增加，α_P、α_n变大。

（2）开通条件：式（1）表明，当α_P、α_n、M_P、M_n增大，且满足$\alpha_P M_P+\alpha_n M_n=1$时，才使晶闸管开通。有两种开通条件：靠转折电压开通或门极电流开通。①靠转折电压开通。没有门极信号，$\alpha_P M_P+\alpha_n M_n\ll1$时，式（3）为$i_A\approx I_{L1}+I_{L2}$。此状态为断态（图5中的Ⅰ）。外加电压增大之后，引起J2雪崩击穿，M_P、M_n增大，电流增加，α_P和α_n变大，当$\alpha_P M_P+\alpha_n M_n=1$，引起转折（图5中的Ⅱ）。$i_A$继续增大，在$\alpha_P$、$\alpha_n$增大的同时，$M_P$、$M_n$减小，晶闸管由呈负阻状态（图5中的Ⅲ）进入J2为正向偏置状态，晶闸管呈现类似于二极管的低阻状态（通态）（图5中的Ⅳ）。②靠门极电流开通。门极通过电流i_G使N1P2N2晶体管α_n增大，由于$i_{C2}=i_{B1}$，P1N1P2晶体管的α_P也增大。当满足$\alpha_P M_P+\alpha_n M_n=1$时，晶闸管开通。

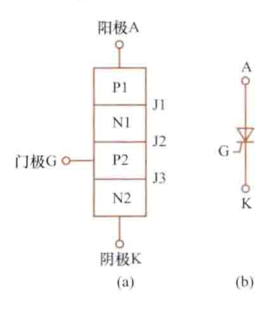


图3　反向阻断晶闸管示意图

（a）管芯结构；（b）图形符号

在门极加适当高的门极电压，使门极电流i_G高于门极触发电流，则晶闸管正向电压即使低于U_{BO}，亦可由断态转变为通态。此后只要通态电流高于维持电流I_H，则晶闸管始终处于通态，且与门极触发信号存在与否无关。直到正向通态电流低于维持电流I_H才能恢复断态，所以这种普通反向阻断晶闸管在A、K间直流电压作用下不能自关断。

（3）关断方法：使晶闸管关断有两种方法：①A、K之间外加反向电压；普通晶闸管一般采用此方法。②加大电路阻抗，使通态电流下降到维持电流I_H以下。

反向阻断晶闸管的主要参数　晶闸管的耐压性能-反向不重复峰值电压U_{RSM}和断态不重复峰值电压U_{DSM}是重要参数。由普通反向阻断晶闸管的伏安特性（图5）可见，普通反向阻断晶闸管的反向特性与二极管反向特性相似，但在正向特性上却有阻断和导通两种状态。因此表征晶闸管耐压性能有反向转折电压和正向转折电压两个值。在产品规格中用比前两者稍

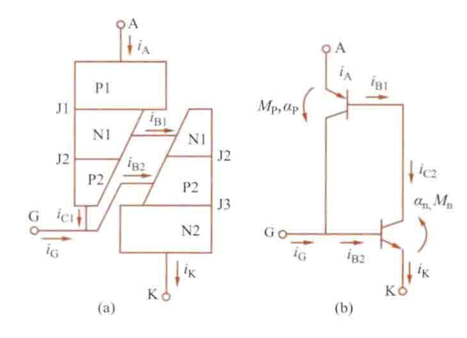


图4　晶闸管工作原理

（a）与晶闸管等效的两个晶体管；（b）相应的等效电路

低的整数电压作为晶闸管的耐压主要参数：有反向不重复峰值电压 U_{RSM}、断态不重复峰值电压 U_{DSM}，此为晶闸管上所能承受的短时极限电压。前者相当于图 5 中的 U_R，后者为不加 I_G 时管子能维持断态的最大电压 U_{BO}。通常所标定的晶闸管电压等级是以反向重复峰值电压 U_{RRM} 及断态重复峰值电压 U_{DRM} 来给定。而 U_{RRM}、U_{DRM} 可由 U_{RSM}、U_{DSM} 值确定，中国现行国家标准则以 90%U_{RSM} 和 90%U_{DSM} 分别作为 U_{RRM} 和 U_{DRM} 值。

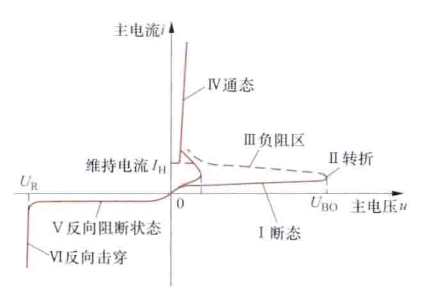


图 5 反向阻断晶闸管主电压-电流特性曲线

在正向导通状态下主要参数是通态平均电流 I_T、通态电压 U_T、门极触发电压 U_{GT}、门极触发电流 I_{GT}、通态电流临界上升率 di/dt 及断态电压临界上升率 du/dt。晶闸管的反向恢复时间 t_{rr} 为主要动态参数。

jingzhaguan baohu dianlu

晶闸管保护电路 (protective circuit for thyristor)

能防止晶闸管因过电流或过电压而损坏的电路。由于晶闸管热容量小，承受过电流和过电压的能力差，为了提高晶闸管装置的可靠性，除合理选择晶闸管参数外，还需要设置一定的保护电路。晶闸管保护主要有过电流保护和过电压保护两种。

过电流保护 晶闸管装置工作时，可能由于输出侧短路、过载或器件击穿短路等原因发生短路和过电流等情况。电子保护电路、快速熔断器、过电流继电器和直流快速断路器是较为常用的措施。

电子保护电路 采用过电流反馈控制的方法，在交流侧设置电流互感器，当出现过电流信号时，利用此信号控制触发脉冲，使晶闸管导通角减小，迅速减小输出电压，从而抑制过电流。这种方法只适用于外部故障引起的过电流，对装置内器件本身损坏产生的过电流则不能抑制。

快速熔断器 快速熔断器的熔断时间一般都小于 10ms，一旦发生过电流可及时熔断，以保护晶闸管。快速熔断器通常与晶闸管串联，保护作用好，是最有效、应用最广的过电流保护措施。

过电流继电器和直流快速断路器 当发生过电流故障时，过电流继电器动作，使直流快速断路器跳闸。直流快速断路器动作时间一般只用 2ms，是较好的直流侧过电流和短路保护装置。

为了提高保护的可靠性和合理性，一般电力电子装置均同时采用几种过电流保护措施。电子保护电路作为第一保护措施，快速熔断器仅作为短路时部分区段的保护，以避免频繁更换该器件，直流快速断路器整定在电子保护电路动作之后实现保护，过电流继电器整定在过载时动作。

过电压保护 晶闸管工作时，如管子两端电压超过容许承受的最大反向电压，则称为过电压。过电压可导致晶闸管反向击穿而损坏。过电压可分为静电感应过电压和电磁感应过电压两类。

静电感应过电压及其保护 由变压器供电的晶闸管装置，在变压器的一次和二次绕组变比较大的情况下，合闸瞬间一次绕组的高电压会通过极间分布电容耦合到二次绕组中，造成晶闸管的过电压。对这种过电压可采用在变压器上加屏蔽绕组或在二次侧并联适当的电容器的方法加以抑制。

电磁感应过电压及其保护 突然切断电感回路电流会产生电磁感应过电压，这种过电压可能发生在交流侧、直流侧和器件上。例如在交流侧，当变压器一次侧突然跳闸，使励磁电流突然切断，铁芯中磁通在短时间内变化很大，因而在二次侧感应出很高的瞬时过电压；在直流侧，以电动机为负载（图 1）时，当与导通晶闸管串联的快速熔断器因过载而熔断时，由于直流主电路中电感储存能量的释放，在整流桥输出端会产生过电压；此外，晶闸管在换相过程中，当 di/dt 很大时也会产生关断过电压，其值可达工作电压峰值的5～6倍。这种过电压可采用阻容吸收保护电路和非线性压敏电阻保护来抑制。①阻容吸收保护电路（图 2）：由于电容两端电压不能突变，故它能限制电压变化率，抑制过电压数值。电阻起消耗能量、抑制振荡的作用。通常阻容吸收保护电路就近直接并联在晶闸管两端，不仅可以抑制器件开关换流引起的电压尖锋，还能够吸收直流母线上的浪涌电压。②压敏电阻保护：压敏电阻是一种非线性电阻，具有正、反向相同且很陡的伏安特性（见图 3），抑制过电压能力强，反应速度快，本身体积小。有碳化硅、氧化锌等多种压敏电阻，是较好的过电压保护元件。氧化锌压敏电阻发展很快，有取代其他种类压敏电阻的趋向。压敏电阻可接在交流侧或直流侧（图 4）。

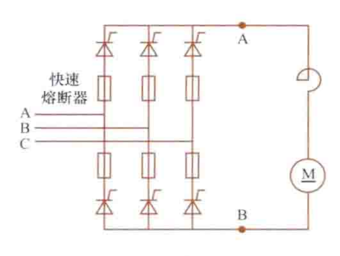


图 1 电动机作负载

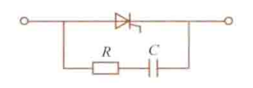


图 2 阻容吸收保护电路

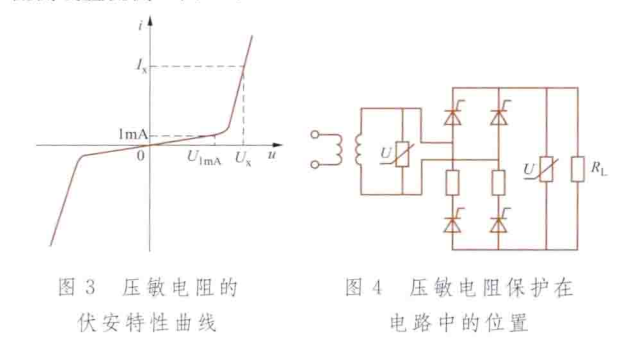


图 3 压敏电阻的伏安特性曲线　　图 4 压敏电阻保护在电路中的位置

jingzhaguan chufa dianlu

晶闸管触发电路 (trigger circuit for thyristor)

向晶闸管门极提供相位、幅度和宽度符合要求的脉冲电流，以控制管子导通的电路。门极脉冲电流的好坏，对晶闸管开通特性有很大的影响。一般要求触发脉冲信号有足够的功率、一定的脉冲宽度等。为了保证器件在正常正向阻断状态时不被误触发，不触发时，触发电路应保持低电平，甚至负电平。在实际应用中，为了可靠触发，除了对驱动波形有要求

外，触发电路还应同时具有电气隔离、同步、移相等功能。

晶闸管触发电路有单结晶体管触发电路和集成化晶闸管触发电路两种。

单结晶体管触发电路　如图 1 所示，其工作原理如下：正弦交流电源由同步变压器 T 降压，经桥式整流并经R_1和稳压管 V1 削波形成梯形电压。此梯形电压既是单结晶体管 V2 的供电电源，又是对电容 C 充电的同步电压。当电容 C 充电达到单结晶体管的峰点电压 U_P 时，单结晶体管导通，C 经电阻R_3放电，输出触发脉冲。当电容 C 放电到单结晶体管的谷点电压U_V时，V2 截止，输出电压U_{b1}为零。继而 C 再次充电，重复上述过程，形成一串输出脉冲。改变R_W可改变产生第一个脉冲的时刻，从而达到移相的目的。图 1 电路的波形图如图 2 所示。

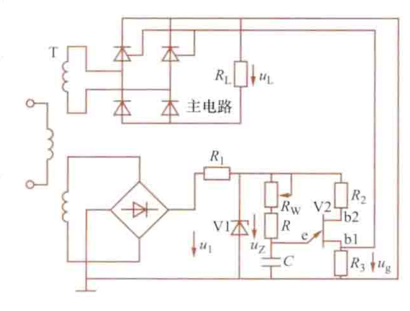


图 1　单结晶体管触发电路

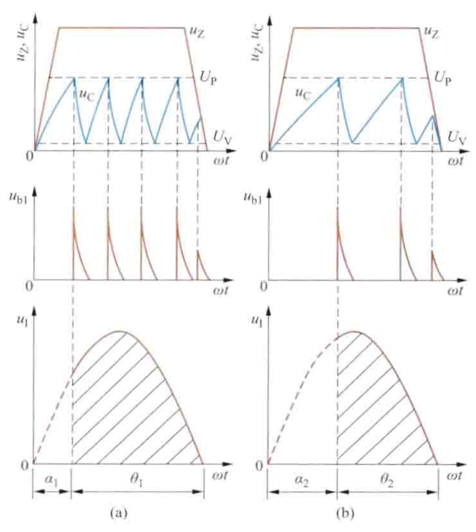


图 2　单结晶体管触发电路的波形图（改变 R_W 可改变控制角 α）

(a) $\alpha=\alpha_1$；(b) $\alpha=\alpha_2$

在图 1 所示电路中，触发脉冲由R_3输出，触发电路与主电路在电气上直接联系，不够安全；且R_3阻值较大时，漏电流在R_3上的压降可能会使晶闸管误触发，因而常采用脉冲变压器 T 作为隔离变压器并输出触发脉冲（见图 3）。图 3 虚线框内为门极-阴极电路示例，V 用以阻止在门极上加反向电压，R 是串联电阻（可调，防止门极电流过大），C 用于吸收噪声电压。

这种触发电路的优点是电路结构简单，调试容易，功率损耗小，有一定的抗干扰能力；缺点是线性度较差，输出脉冲较窄，功率也较小。一般用于移相范围小于 150°、50A 以下的小功率可控整流电路中。

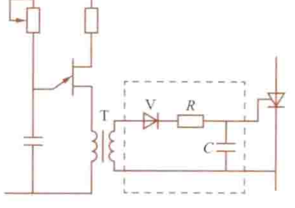


图 3　用脉冲变压器输出触发脉冲

集成化晶闸管触发电路　分立元件的触发电路较为繁琐，调整测试过程复杂，晶闸管触发普遍采用触发集成电路完成。集成触发器将同步信号、脉冲移相、脉冲形成等环节集成为一体，具有安装调试方便、体积小、功耗低、温漂小、移相范围宽、线性度好、性能稳定可靠等优点。几个比较有代表性的集成电路有双路脉冲触发器 KJ004、单片晶闸管移相触发器 TCA785、单电源模数混合集成触发器 KC168 等。KJ004 是使用较为广泛的中国产单相移相集成电路，双列直插（DIP-16）封装。该芯片为单相移相触发，能够输出两路相差 180°的移相脉冲，可以构成晶闸管单相全桥控制触发电路。TCA785 与中国产 KJ004 相比，其产生同步信号的零点识别更加可靠，输出脉冲更加对称整齐，且移相范围更宽，在晶闸管变流器中得到广泛应用。它由零点鉴别器、同步寄存器、控制比较器、放电监控器、电平转换及其稳压器、锯齿波发生器及输出逻辑网络等单元组成。KC168 是一款单电源供电的模数混合集成电路，主要适用于单相或三相晶闸管移相触发电路。

jingjian zhiling xitong

精简指令系统　(reduced instruction sets，RIS)　见指令系统。

jingdianchang

静电场　(electrostatic field)　存在于静止带电体周围、以电场强度表征的一种特殊形式的物质。静电场对静止电荷有作用力。在电工技术中，通常不必涉及个别原子的细微结构所呈现的微观电场，只研究上亿个以至更多带电粒子的统计平均效应。因此上述静止带电体是指宏观上相对于观察者没有运动的带电体。人们把静止电荷称为静电场的场源。在无限大真空中，两个静止点电荷之间的作用力，可由库仑定律确定。描述电场的基本物理量是电场强度 $\boldsymbol{E}$ 和辅助量电通密度 $\boldsymbol{D}$。

均匀电场和不均匀电场　若空间某区域内各处的电场强度的量值和方向都相同，则称该区域中的电场为均匀电场，否则称为不均匀电场。两块距离很小、平行的金属圆形薄板，带有等量异号电荷时，在极板中间部分区域内的电场就可近似为均匀电场，而在薄板边缘附近的电场为不均匀电场。作为不均匀电场的示例，图 1 和图 2 给出三相输电线的电场线（红线）和等位线（蓝线）图形。

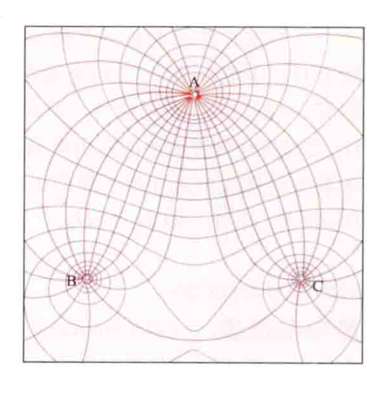


图 1　三相输电线的电场线和等位线图形（$\omega t=0°$）

$u_A(t)=\sqrt{2}U_0\cos(\omega t)$

$u_B(t)=\sqrt{2}U_0\cos(\omega t-120°)$

$u_C(t)=\sqrt{2}U_0\cos(\omega t-240°)$

静电场中的导体与绝缘体　导体内存在大量自由电荷，如自由电子电荷。根据电荷静止的特点，位于静电场中导体内部的电场强度必为零。否则，自由电荷将不会静止。导体所带电荷分布于表面。绝缘体内自由电荷数量极少可忽略不计，但存在大量束缚电荷，如束缚电子与原子核电荷。在电场作用下，绝缘体内部会呈现大量的电偶极子，它

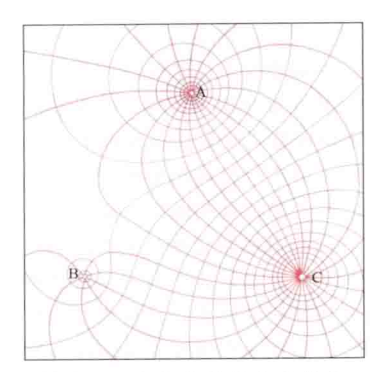


图2　三相输电线的电场线和等位线图形（$\omega t=45°$）

$u_A(t)=\sqrt{2}U_0\cos(\omega t)$

$u_B(t)=\sqrt{2}U_0\cos(\omega t-120°)$

$u_C(t)=\sqrt{2}U_0\cos(\omega t-240°)$

们是成对的等量异号束缚电荷。绝缘体出现极化现象时，会改变原来的电场分布。在线性各向同性电介质中，可用电容率ε表示绝缘体材料的电极化特性，并有

$$\boldsymbol{D}=\varepsilon\boldsymbol{E}$$

静电场的基本规律　（1）高斯通量定理。在静电场中，由任意闭合面穿出的电通密度通量等于该闭合面内自由电荷q的代数和，即

$$\oint_S \boldsymbol{D}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=\sum q$$

相应的微分形式是

$$\nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho$$

式中ρ是自由电荷体密度。

（2）静电场的无旋性。在静电场中，沿任一闭合路径移动单位正电荷的电场力所做的功为零。它可用沿任一闭合路径的电场强度的环路积分为零来表示，即

$$\oint_l \boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}=0$$

相应的微分形式是

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=0$$

这样静电场还可以用标量电位φ来描述。φ与E的关系是

$$\boldsymbol{E}=-\nabla\varphi$$

静电场的能量　在线性电介质中，单位体积内的电场能量，即电场能量密度，为$(\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{E})/2$。整个静电场的能量$W_e$为

$$W_e=\int_V \frac{1}{2}\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{E}\mathrm{d}V$$

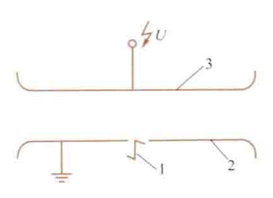
式中$\mathrm{d}V$是体积元，积分区域V是整个静电场区域。

电介质分界面电场满足的条件　在电介质1和2的分界面上有：①电介质1、2的电场强度切向分量E_{1t}和E_{2t}相等，即$E_{1t}=E_{2t}$。②电介质1、2的电通密度的法向分量D_{1n}、D_{2n}之差等于分界面上的自由电荷面密度σ，即$D_{1n}-D_{2n}=\sigma$。这里法向规定由电介质2指向1。自由电荷面密度σ为零时，D_{1n}和D_{2n}相等，即$D_{1n}=D_{2n}$。

jingdian dianyabiao

静电电压表

（electrostatic voltmeters）　利用静电作用力的原理构成的测量稳态电压的表计或装置。可直接测量直流高电压和频率直至1MHz的交流高电压。其原理是加电压于两平板形电极，电极就会受到所加电压产生的静电力作用，测量此静电力的大小或由静电力引起的某一极板的偏移或偏转，即可知所加电压的大小。测量高电压的静电电压表一般在接地电极中部开一个小孔，内放一个可动电极（见图），静电力使可动电极偏转，同时带动其上的小镜子将由光源射出的光束反射到标尺上，该光标即可指示出电压值。静电力大小决定于电压有效值，故静电表测得的是电压的有效值。常用的静电电压表满刻度的测量准确度为±1%～±3%，绝对仪用的静电电压表，其测量准确度可达±0.01%。



静电电压表电气原理图
1—可动电极；2—接地电极；3—高压电极

静电电压表的优点是可直接测量高电压，最高量程可达500～1000kV，输入阻抗极大并且基本不从电路里吸取功率。其缺点是体积较大，携带不便，测量准确度和可靠性易受机械振动和风的影响，一般不宜在户外使用。已有SF_6绝缘密封型静电电压表，其体积小，使用时受环境影响也小，但整体结构更为复杂。

jingdian ganying

静电感应

（electrostatic induction）　位于静止带电体附近的导体，受电场影响而使导体中电荷重新分布的现象。导体内含有大量自由电子，不带电导体在附近带电体电场的作用下，自由电子将发生宏观位移，当到达新的静电平衡后，在靠近带电体一侧表面出现与带电体极性相反的电荷分布，远离带电体的另一侧表面出现与带电体上电荷极性相同的电荷分布，整个导体表面的总电荷量仍维持原来的数值。

静电感应的作用　在高电压设备附近的导体，虽然它们与高电压设备之间没有直接的电连接，但导体受高电压设备静电场的影响，会产生静电感应现象。如果有些导体与大地之间的绝缘电阻不大，则经过一定时间后，与高电压带电体同号的电荷泄漏入地，使导体累积有相当数量的异号电荷，造成导体与地间有较大的电位差。人若不慎与之接触，则将危及生命。同样理由，输电线路受近旁雷云的静电感应而积累某一极性的电荷，当雷云对地放电后，这些电荷会在输电线路上产生感应过电压波，有可能损坏电力系统中某些绝缘薄弱环节，造成事故。另一方面，静电感应起电机（范德格拉夫静电发生器）则是利用静电感应原理构成的直流高电压发生装置，应用于物理学科的某些研究领域。

静电感应的抑制　为了消除或减弱静电感应的影响，可采用静电屏蔽。方法是将高电压设备或被保护设备用具有良好接地的金属导体（经常制成丝网状）把它们包围起来，使被包围的设备与外界之间基本上没有静电耦合。静电屏蔽广泛应用于电器仪表和通信电缆等设备，使之减少或不受外部静电场的干扰。此外，在高电压输电线路上架设避雷线，可降低感应过电压的影响。

jingtai cixing celiang

静态磁性测量

（static magnetic characteristics measurement）　在恒定或缓慢变化磁场的磁化下，磁性材料磁特性的测量。包括基本磁化曲线、磁滞回线以及由这些曲线定义的各种磁参量，如剩磁B_r、矫顽力H_c、最大磁导率μ_m、最大磁能积$(BH)_m$等的测量。

测量静态磁性的传统方法是冲击法，原理线路见图1(a)。对于环形试样，磁场强度H可根据试样几何尺寸及相应的磁化电流计算得出。为测量磁通密度B，应将测量线圈

与具有积分作用的冲击检流计（或磁通计）相连，利用换向开关迅速改变磁化线圈中电流的方向，使试样中磁通方向突然倒向，于是在测量线圈中感应出脉冲电动势。由于测量线圈与冲击检流计构成闭合回路，所以有脉冲电流通过，从而引起冲击检流计线圈冲掷偏转，其最大偏转角正比于试样中磁通的变化（$\Delta\varphi$）。如此，由冲击检流计偏转角、冲击常数［用标准互感器（见标准电感器）确定］及试样的等效截面，便可计算出被测的磁通密度。

基本磁化曲线就是幅值不同的磁滞回线顶点的连接线，如图1（b）中$0abA_m$曲线。测量时，应将磁化场从弱到强单调增加，并在不同磁场强度幅值H_i下，突然改变试样中磁场的方向，由冲击检流计测出相应的磁通密度B_i。依次测出各磁滞回线的顶点$a(H_a, B_a)$、$b(H_b, B_b)$、…、$A_m(H_m, B_m)$，将这些顶点连接起来，便得到基本磁化曲线。根据基本磁化曲线（$B-H$），可绘制出（$\mu-H$）曲线，从而可确定磁导率。图2所示为软磁直流测试系统。

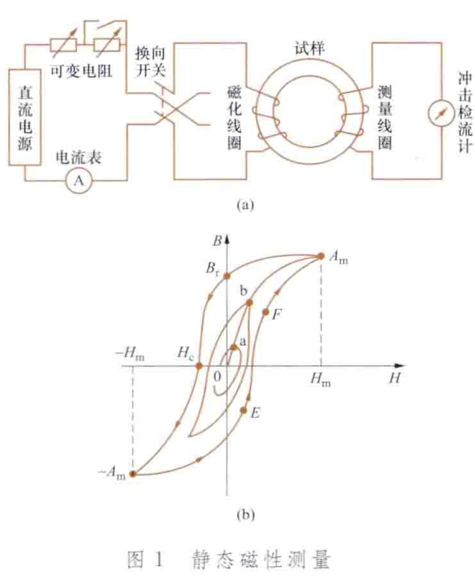


图1　静态磁性测量

（a）原理接线图；（b）静态磁特性曲线

通常要测定的是饱和磁滞回线，如图（b）中$A_mB_rH_c(-A_m)EFA_m$回线。测量磁滞回线时，必须注意材料的磁滞特性，也就是测量时磁化场一定要按$H_m\to0\to-H_m\to0\to H_m$规律变化，使得试样磁状态按图（b）上箭头所示的方向改变，并测出相应的磁场强度和磁通密度。这样就可绘出磁滞回线。由于磁滞回线具有对称性，故只要测出回线的上半支，其下半支便可按对称原则绘出。



图2　软磁直流测试系统

若被测试样是条形的开磁路样品，则需要放在磁导计或电磁铁中磁化。冲击法对开磁路样品也完全适用，但此时不仅B要用冲击检流计测量，H也要用冲击检流计测量。

冲击法灵敏度高，测量误差小，因此得到广泛应用；但它有一定的原理性误差，且测量过程不连续，要逐点进行。若采用自动扫描磁化电源、电子积分器和x-y记录仪组合，便可形成静态磁性自动测量仪。它能连续自动磁化，并记录磁化曲线和磁滞回线。

jingzhishi diannengbiao

静止式电能表　（static kWhmeter）　应用模数转换技术测量电能并以数字形式显示的电表。由于它不再利用感应系测量机构带动铝圆盘做机械旋转，而是依靠模拟和数字电子电路实现电能计量，因而被称为静止式电能表。

静止式电能表的工作原理为先进行交流电压与电流的相乘，以获得周期T内的平均功率，再对后者实施积分运算，得到表征积分时段（t_2-t_1）内的电能W，亦即实现$P=\frac{1}{T}\int_0^T ui\,dt$和$W=\int_{t_1}^{t_2}P\,dt$的运算，其中$t_1$、$t_2$为计量电能的起始和终止时刻。

静止式电能表的优点是准确度、线性度、频率特性、温度特性等均优于感应系电能表；此外，它还适用于测量谐波成分较大的信号。

具体实现上述原理的方法可归纳为模拟相乘法和采样计算法两大类。

模拟相乘法　其原理框图如图1所示。输入量u与i先经过互感器，再进入由模拟器件构成的瞬时值乘法器实现相乘，其输出信号中包含了表征周期T内平均功率$UI\cos\varphi$的直流成分A（直流电压或直流电流）及交变的脉动成分B。U/f或I/f转换器将两者同时转换成频率信号f。若在较长时段内累计到频率信号的脉冲数为N，则由于成分B的交变性质，其对时间的积分值甚小或等于零，因而，脉冲数N只表征了A的积分值，即此时段内所测量的电能值。在工频电能计量中，时分割式模拟乘法器的应用最广泛，因为它的转换误差极小，价格低廉，且可靠性高。

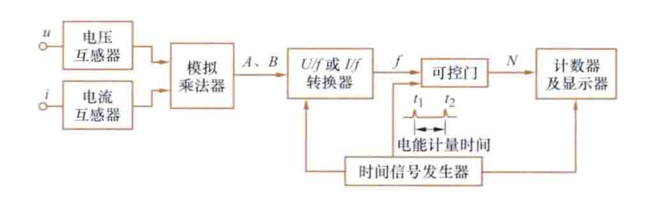


图1　模拟相乘法静止式电能表框图

基于模拟相乘法制造的静止式电能表被较多制成计量用的标准表，也有工业现场用的产品。

采样计算法　应用快速A/D转换技术，在周期T内对电压和电流进行n次采样，采得的数值由微机进行相乘，获得n个乘积p_1，p_2，…，p_n。然后再进行$P=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}p_i$运算，获得各周期的平均功率$P$。最后按要求计量电能的时段，将其间各周期的$P$累加，即得到电能值。图2所示为长寿命单相电子式电能表，图3所示为电子式电能表程控流水线。



图2　长寿命单相电子式电能表

基于采样计算法的静止式电能表一般制成可同时测量电压、电流、功率因数、无功功率、最大需量等参量的多功能电表，用于对工矿企业电能耗用状况的记录与分析。



图 3　全空调、准净化的电子式电能表计算机程控流水线

集电能计量、多费率、电力线载波抄表、防窃电、信息存储和处理等多方面功能于一体的静止式电能表，又称多功能电能表。

数字化变电站中用于电能计量的表计是数字量输入式电能表。它最大的特点是其输入已不是模拟量，而是出自合并单元、按标准传输格式输出的数字化三相电压、电流量值。它对输入的数字化测得信息数据进行解调后，在完成功率计算、电能计量、响应结果存储及管理等功能方面，与静止式电能表相同。

jubu fangdian

局部放电　(partial discharge)　电气设备绝缘结构中局部区域内的放电现象。这种放电只是绝缘在局部范围内被击穿，导体间绝缘并未发生贯穿性击穿，若局部放电长期存在，则在一定条件下可造成设备绝缘电气强度的破坏。

起因及危害性　电气绝缘结构中若存在局部的电场较强处，或因制造工艺不完善、运行中有机物分解、绝缘受机械力作用而发生开裂等原因在绝缘中形成缺陷，则在电气设备运行时绝缘中的这些部位就容易击穿而发生局部放电。在金属（或半导电）电极的尖锐边缘处，或具有不同特性的绝缘层间，局部放电更易发生。

局部放电虽然只是绝缘局部发生击穿，但每次放电对绝缘都会有轻微损伤。造成损伤的原因有：①介质局部温度上升，氧化加速，使介质的电气、机械性能下降；②带电粒子撞击介质，切断分子结构；③放电作用下产生的活性气体与介质发生化学反应，使介质性能变坏。为保证电气设备在运行中有足够的可靠性，不允许在其绝缘中有局部放电，或只允许有轻微的局部放电。

特性参量　有视在放电量、放电重复率、平均放电电流、放电功率、局部放电起始电压、局部放电熄灭电压等。

(1) 视在放电量：每次局部放电时，绝缘的损伤与局部区域参与放电的电荷量有关。此电荷量称为真实放电量，实际上无法测量。但每次放电时，绝缘两侧导体上的电压会产生微小突变量 ΔU_x，此值可以测得。定义 $q=C_x\Delta U_x$（C_x 为导体间绝缘的电容量）为视在放电量，它与真实放电量间有一定关系。

(2) 放电重复率：在选定的时间间隔内测得的单位时间内局部放电的平均次数。实际上放电重复率总是相对于一定的视在放电量而言的。

(3) 平均放电电流：一定的时间间隔内，视在放电量绝对值的总和与此时间间隔的比值。

(4) 放电功率：一定的时间间隔内，视在放电量与产生放电时导体间电压瞬时值乘积的总和与此时间间隔的比值。

(5) 局部放电起始电压：对电气设备绝缘施加逐步升高的试验电压时，局部放电视在放电量超过某一规定值时的最低试验电压值。

(6) 局部放电熄灭电压：加于电气设备绝缘的试验电压从超过局部放电起始电压的较高值逐渐下降时，局部放电视在放电量小于某一规定值时的最高试验电压值。

jubu fangdian celiang

局部放电测量　(partial discharge measurement)　见局部放电试验。

jubu fangdian shiyan

局部放电试验　(partial discharge test)　对被试品在承受高电压作用时产生的局部放电信号进行的检测或测量。高灵敏度的局部放电试验能发现绝缘系统的缺陷，是某些产品出厂试验的重要项目，也可作为验收试验或运行中设备的预防性试验。

局部放电试验起源于 20 世纪 40 年代对高压设备无线电干扰性质的研究，以前称为电晕试验，后来规定只有大气中的局部放电才称为电晕，对一般绝缘的局部放电试验不再用电晕试验的名称。局部放电试验技术经几十年发展已日臻成熟，国际电工委员会（IEC）第 270 号出版物和中国国家标准 GB/T 7354《局部放电测量》对该试验技术已作详细规定。先进的测试仪器配备有计算机数据处理设备，对放电的定性、定量和定位能作出更好的判断。对运行中设备进行连续在线监测局部放电的工作，也正在进行中。

局部放电试验电压依据被试设备的标准或技术规范而定，通常在最高工作电压的 1.1～1.5 倍的范围内。考虑到实际运行中会出现过电压激发起局部放电，而后在运行电压下放电并不熄灭的情况，因此在试验中也规定短时增加更高电压，然后降回到试验电压下持续一段时间进行测试。允许的局部放电量的标准因设备而异。对于工作场强很高，绝缘材料易在局部放电作用下损伤的设备，包括电容器、油纸套管、互感器、六氟化硫组合电器、环氧树脂浇注变压器等，对允许的局部放电量的限制比较严格。有的设备使用的绝缘材料有很强的抗局部放电能力，例如电机绝缘用的添加云母的绝缘材料，允许有较高的局部放电量。

局部放电会产生下述效应：①在提供电压的电回路中产生电脉冲信号；②在电介质中产生功率损耗；③在紫外可见光波段直至无线电频率范围内有电磁辐射；④声辐射；⑤材料受放电作用后的化学变化。

针对不同的放电效应有不同的试验方法。比较常用的试验方法是对局部放电脉冲进行测量和对局部放电的超声波辐射信号进行探测。

局部放电的电脉冲测量

测量电路　主要包括被试品、耦合电容器和检测阻抗，有两种基本电路：直接测量电路和平衡测量电路。

直接测量电路　如图 1 所示。图 1（a）中检测阻抗与

耦合电容器串联，图1（b）中检测阻抗与被试品串联。两种接线方式中，试品的放电脉冲电流都可通过检测阻抗向放大器提供脉冲信号。

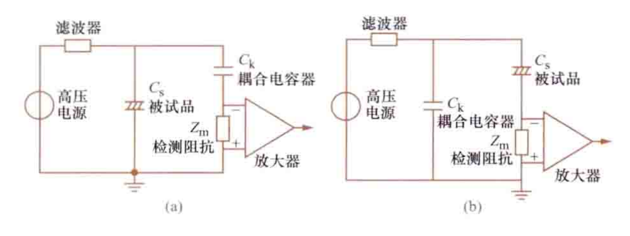


图1　直接测量电路

（a）检测阻抗与耦合电容器串联；（b）检测阻抗与被试品串联

平衡测量电路　如图2所示。图2（a）是桥式电路，可以调整到对外界干扰信号有最好的平衡效果；图2（b）采用平衡输入单元，没有调整能力，当C_k和C_s性质相同时有理想的平衡效果。

检测阻抗　也称作输入单元，是将局部放电脉冲电流转换成向放大器提供的脉冲电压信号的一个二端口网络。它通常是由电阻、电容和电感组成的电路，其频率特性要与放大器相配合。实际上，考虑检测阻抗的频率特性时还应考虑与检测阻抗连接的被试品、耦合电容器及连接线等的影响。

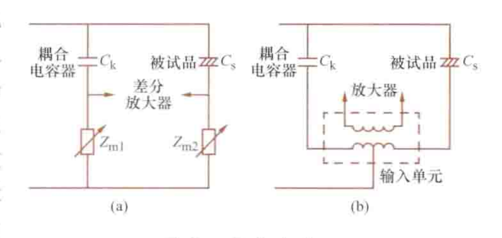


图2　平衡电路

（a）桥式电路；（b）平衡输入单元

根据检测阻抗的频率特性，分宽带测试和窄带测试两种。宽带测试能比较正确反映放电脉冲的波形，但往往受外界干扰影响较大。窄带测试可以躲避某些强烈的外部干扰（无线电广播的干扰等），适宜于在工厂或户外现场的条件下使用。但它会对脉冲波形造成很大的畸变，当脉冲重复率较高或被试品内有行波的折射、反射过程时，会出现脉冲叠加现象。

中国国家标准建议，宽带测试时，下限频率f_1、上限频率f_2和带宽Δf分别为：$30\text{kHz} \leqslant f_1 \leqslant 100\text{kHz}$，$f_2 \leqslant 500\text{kHz}$，$100\text{kHz} \leqslant \Delta f \leqslant 400\text{kHz}$；窄带测试时，带宽$\Delta f$和中心频率$f_m$分别为：$9\text{kHz} \leqslant \Delta f \leqslant 30\text{kHz}$，$50\text{kHz} \leqslant f_m \leqslant 1\text{MHz}$。

放大器　局部放电脉冲十分微弱，在用检测阻抗检出后需用放大器放大。放大器的频率特性应与检测阻抗相配合。放大器频率范围的选择还取决于试品性质、试验目的、环境条件及仪器设备条件等因素。

放电量的校准　局部放电测试仪通常不能直接得出视在放电量的数值，要用幅值已知（U_0）、模拟局部放电波形（上升时间t_r小于60ns、衰减时间t_d大于$1/f_1$）的校准脉冲，通过校准电容C_0施加于被试品两端；若C_0远小于测试回路的总电容C，如图1（a）中$C=C_s+\dfrac{C_kC_m}{C_k+C_m}$，式中$C_m$为$Z_m$中的并联电容。则注入的电荷为$q_0=C_0U_0$，测试装置的刻度因数$k=\dfrac{q_0}{\alpha}=\dfrac{C_0U_0}{\alpha}$，式中$\alpha$为仪器响应读数。于是，若在试品放电时，测得的响应读数为α_k，则被试品的视在放电量$q_x=k\alpha_k$。一般校准是被在试品不加电压时进行，在被试品施加电压时要将校准装置拆除，但要保证测试系统的灵敏度不变。

局部放电的超声测量　探测局部放电超声信号的主要目的是对局部放电源进行定位。置于设备表面的传感器接收到超声波后转换成电信号，经放大加以检测。由于在超声波传播过程中信号衰减受材料性能及传播路径的影响很大，将超声波作为局部放电的检测对象时，主要是利用声信号传播的方向和声信号滞后于电信号的时延或不同点测得的声信号之间的时延来确定局部放电源位置。声信号和电信号的联合测试可以取得较好的定量和定位效果。

juyuwang

局域网

（local area network，LAN）　在某一区域内由多台计算机、网络设备互联成的计算机网络。局域网通常设在楼宇或大院内，通信范围可在100km以内，其数据传输速率为1～1000Mbit/s，延迟小，误码率低（10^{-8}～10^{-11}）。局域网在文件传输、图形传递、电子函件、数据库存取、数字声音、数字图像、办公自动化、询问/应答等方面已得到广泛应用。图1所示为网络设备。

组成　局域网由传输媒体及附件、网络接口板（网卡）、网络服务器（见图2）以及中继系统组成。微机、工作站等都可连接于局域网实现通信和资源共享。



图1　网络设备



图2　服务器

（1）传输媒体及附件。传输媒体有双绞线、同轴电缆和光缆。此外，无线电和红外线也已作为新的传输媒体用于局域网。附件有连接插头，终端匹配器，电光、光电交换器等。

（2）网络接口板。又称通信控制卡或通信适配器。它提供物理层和媒体访问控制子层或以上层的功能。随着局域网控制器芯片的固化层次的提高，通信适配器的功能在不断增强。

（3）网络服务器。由通信适配器、高档微机、大容量硬盘和打印机等组成。其功能是管理用户通信和共享资源。它采用了数据高速缓存和目录高速缓存技术，以加快网络的响应；采用了硬盘的磁道映射、磁盘映射和服务器映射，以提高磁盘和文件服务器的可靠性；采用了硬盘阵列，以增大容量。

（4）中继系统。用于把两个以上局域网互联起来，实现透明传输。

分类　根据媒体接入控制的不同方法，有总线网、令牌总线网、令牌环网等多种局域网。

(1) 总线网。计算机经通信适配器连接到共享的总线。总线网的接入原则：要发送帧的站，先监听总线上的载波；确认信道空闲方可发送帧的方式，实现多路接入，争用总线；如检测到帧的冲突，则各自退避随机时间，以缓解争用的冲突。总线接入方法的实现相对简单，但随着争用的严重，增大了网络的时延。除总线网外，另一种是星形网。入网的计算机使用大楼内现成的两条电话线，连接到集线器，呈星形拓扑网络。集线器起双向转发、冲突检测、故障旁路等作用。在多集线器网内，集线器又起路由选择作用。

(2) 令牌总线网。经通信适配器而连接共享总线的各站，按站号的次序组成逻辑环路，依次传递令牌帧。收到令牌的站，根据令牌环行本站时间的长短，待发信息的优先级，可截获令牌，改发信息帧，或把令牌立刻转交给下一站。虽然令牌管理机制的实现较复杂，但采用令牌能有效地减小高负荷下网络的时延。令牌总线网，在物理上是一个总线网，而在逻辑上是一个令牌环。

(3) 令牌环网。一个计算机网络适配器内的发送器，经屏蔽或无屏蔽的双绞线，连到下一个计算机网络适配器内的接收器，逐点相连，形成物理闭合环路。不工作的站，其输入与输出直接旁路。有一令牌帧，逐站环行。令牌环网的接入原则：要发送帧的站在获得令牌帧后，发送一帧数据，该帧绕环一周。中途目标站将数据抄入自己的站中，并在帧状态字节标注响应信息。当源站接收完该帧以后，将数据从环上移去，并且发送一个令牌帧。下面的站获得令牌帧以后方可发送数据。这样环中任何时候都只存在一帧数据在其上传输。

常用（高速）局域网　主要有光纤分布式接口（fiber distributed data interface，FDDI）和交换式局域网等。

(1) 光纤分布式接口网。数据传输速率为100Mbit/s。正常情况下只用主环线路，当光纤或接口设备出现故障时，环路自动重构成单环结构继续工作。FDDI与一般的令牌环网不同，除它采用4B/5B（群码制GCR）编码不同外，当一个站发完一帧数据或允许发送数据的时间到时，立即发出一个令牌帧。这和一帧数据被源站接收并移去以后才发出令牌有很大不同。因为下一个站获得令牌后就立即可以发送一帧数据，此时前一个站发送出的帧可能还没有被源站全部接收，甚至可能还没有到达它的源站，因此环中可能同时存在多帧数据同时传输。

(2) 交换式局域网。有两种方式：一是将交换技术用到桌面系统上来，每个用户独自使用一条链路可提高用户的平均数据传输率；二是采用异步转移模式（asynchronous transfer mode，ATM）交换技术形成ATM局域网。对于以太帧而言，还可以在ATM网络边沿先把一帧分成多个信元(ATM Cell)，然后采用信元交换的方式进行交换。交换以后，再把信元组装成帧，实现了ATM与以太网互联。这种技术也称为ATM网LAN仿真技术。

局域网络扩展　局域网有统一的逻辑链路控制子层，可用网桥扩展两个以上局域网通信子网。在局域网文件服务器内，插上两（或多）块与各段局域网相连的通信适配器，配以相应的路由选择软件，可实现网桥功能。每段网络可以有不同的拓扑结构，也可使用不同媒体访问方法的通信适配器及传输媒体。网桥对所收到的帧，按目的地址确定路由。网桥也可配置在局域网的工作站上，可连接近、远程工作站。

采用网桥可以达到：①过滤通信量，如各段内部的相互通信局限在本段内，从而减轻整个网络的负荷；②扩大网的物理范围，解决单个局域网受到的地理长度的限制；③增大允许连接的工作站数目；④可使用不同物理层媒体，如基带电缆、宽带电缆和光纤等共存于一个局域网。

网络互联通常使用路由器完成分组的转发（即中继）和路由选择功能。网关（gate way，GW）也称为网间连接器，用于连接两个不兼容的系统，在高层进行协议的转换。使用相同协议的网络互联时，可用X.25或帧中继更简单的方法。

局域网操作系统　网络操作系统是网络用户和计算机网络之间的接口。网络操作系统具有处理机管理、存储器管理、设备管理、文件管理、作业管理以及网络管理等功能。网络操作系统与计算机的操作系统关系密切。有对等模式、文件服务器模式以及客户机/服务器（client/server，C/S）模式三种常用局域网。

(1) 对等模式的局域网。各工作站兼具客户机和服务器的功能。一个工作站可以访问网上其他工作站的共享资源，也可为其他工作站提供本站的共享资源服务。这种分布式控制具有很高的系统可靠性（见网络软件）。

(2) 文件服务器模式的局域网。需要有一台计算机提供共享的硬盘和控制一些资源的共享，这样的计算机称为文件服务器。在这种模式下，数据的共享大多以文件形式供工作站存取服务。而文件服务器功能有限，它只是简单地将文件在网络中传来传去。这给局域网增加了不必要的流量负载。

(3) C/S（client/server）模式的局域网。作为文件服务器的发展，C/S并不是一种特定硬件产品或服务器技术，而是一种体系结构。C/S模式将处理功能分为两部分，一部分（前端）由客户处理，另一部分（后端）由服务器处理。在这种分布式的环境下，任务由运行客户进程和服务器进程的机器共同承担，这样有利于全面发挥各自的计算能力，可分别对客户机和服务器进行优化。如客户机可承担应用方面的专门任务，服务器则主要用于数据处理。这种C/S模式为用户提供一个理想的分布环境，清除了不必要的网络传输负担。

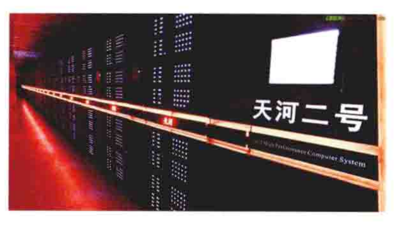
发展　20世纪70年代后期为适应办公自动化的需要，推出了局域网产品。80年代后期以FDDI高速光纤网为主干网，把为数众多的局域网扩展成大型局域网，使局域网在地域上和规模上都有突破。90年代以来，由于交换式集线器的推出，使得虚拟局域网（virtual local area network，VLAN）对用户更加灵活方便。100Mbit/s和（或）1000Mbit/s网卡以及千兆位以太网已商品化，构筑高速局域网已成为现实。在以ATM为主干网的带动下，交换式局域网、局域网仿真技术更加成熟，所有这些都已融会到局域网之中。随着社会信息化、数字化需求的增长，局域网将会更快的发展。

juxing jisuanji

巨型计算机　(super computer)　在一定时期内采用最先进的计算机科学技术和工艺技术制造出的运算速度最

快、存储容量最大、通道速率最高的计算机系统。巨型计算机主要用于繁复的科学计算和模拟，如聚核反应、卫星图像、天气预报、航天、地震、流体力学等研究。

20世纪60年代中期，CDC公司推出了6600机和7600机，是早期的巨型计算机。70年代中期，出现了以CRAY-1为代表的巨型计算机。90年代末，美、日等国已研制成万亿次级的巨型计算机。中国于1983年研制成每秒亿次的“银河”巨型计算机，1992年研制成每秒10亿次的“银河-Ⅱ”巨型计算机，1997年研制成每秒130亿次的“银河-Ⅲ”巨型计算机，2010年研制成每秒千万亿次的“天河一号”超级计算机，2013年研制成每秒5.49万万亿次的“天河二号”超级计算机。图所示为“天河二号”超级计算机。



巨型计算机

（“天河二号”超级计算机）

提高巨型计算机的性能主要靠先进的工艺技术和并行处理技术。

工艺技术　巨型计算机的处理器周期仅1～2ns，组装成的体积仅十几立方英寸（$1in^3 = 1.63871\times10^{-5}m^3$），因此对材料、器件、电路、逻辑电子系统、精细加工、布局与布线、设计自动化、微型组装和自动测试、高效冷却等技术都非常严格。①超高速器件，多数巨型计算机采用超高速硅双极型ECL逻辑门阵列。②高密度微组装技术，机器周期缩短到纳秒级，要求布线尽量短。采用数十层的陶瓷模块、热传导模块、多片载体和表面微组装技术。③高效制冷技术，由于器件密度高，单位体积功耗大，散热问题相当突出，巨型计算机采用风冷、液冷、液氮沸腾冷却技术。

并行处理　早期的巨型计算机采用流水线多操作部件结构，后来又采用多处理机并行处理技术。①共享存储器多处理机，多台处理机通过总线开关网络连成共享存储器的结构，在同一操作系统下运行。由于资源竞争和CPU间通信的额外开销，处理机数目不能多。②分布存储器多处理机，相同功能的带局部存储器的大量处理器经互连网络组成。如超立方体阵列机含有214个处理单元，速度高达每秒262亿次浮点运算。

在软件方面巨型计算机的操作系统大多使用Unix。编程采用FORTRAN、C、PASCAL、Ada等向量化语言。向量并行化编译器以及高效的并行算法是提高程序执行速度的重要手段。

juanji

卷积 （convolution）

分析数学中关于两个函数的一种无穷限积分运算。对函数 $f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ 作如下运算

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau)f_2(t-\tau)\mathrm{d}\tau$$

时，此积分称为卷积积分，简称卷积。常用符号“*”表示 $f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ 的卷积运算，即

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau)f_2(t-\tau)\mathrm{d}\tau = f_1(t) * f_2(t)$$

在线性动态电路分析中，若冲激响应为 $h(t)$，激励信号为 $e(t)$，则电路对 $e(t)$ 的零状态响应 $r(t)$ 等于 $e(t)$ 与 $h(t)$ 的卷积运算，即

$$r(t) = \int_0^t e(\tau)h(t-\tau)\mathrm{d}\tau$$

此处 $e(t)$ 应满足：当 $t<0$ 时 $e(t)=0$，即激励在 $t=0$ 时加入；当 $t<0$ 时 $h(t)=0$，即电路冲激响应函数满足因果周期特性。

卷积的主要性质：

（1）交换律

$$f_1(t) * f_2(t) = f_2(t) * f_1(t)$$

（2）分配律

$$f_1(t) * [f_2(t) + f_3(t)] = f_1(t) * f_2(t) + f_1(t) * f_3(t)$$

（3）结合律

$$[f_1(t) * f_2(t)] * f_3(t) = f_1(t) * [f_2(t) * f_3(t)]$$

（4）微分

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[f_1(t) * f_2(t)] = \frac{\mathrm{d}f_1(t)}{\mathrm{d}t} * f_2(t)$$

（5）积分

$$\int_{-\infty}^{t}[f_1(\lambda) * f_2(\lambda)]\mathrm{d}\lambda = f_1(t) * \int_{-\infty}^{t} f_2(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

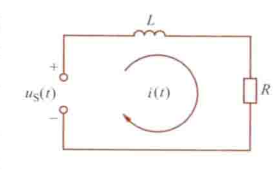
（6）与单位冲激函数的卷积

$$f(t) * \delta(t) = f(t)$$

（7）与单位阶跃函数的卷积

$$f(t) * \varepsilon(t) = \int_{-\infty}^{t} f(\lambda)\mathrm{d}\lambda$$

卷积积分是计算线性电路和线性系统的时域响应的一个重要方法。下面给出一个利用卷积方法求电路的零状态响应的例子。图示电路中，响应是电流 $i(t)$，激励信号是电压源 $u_S(t)$。若已知 $u_S(t)=\varepsilon(t)-\varepsilon(t-t_0)$，冲激响应 $h(t)=\frac{1}{L}e^{-\frac{R}{L}t}\varepsilon(t)$，其中 $\varepsilon(t)$ 是单位阶跃函数，则在上述 $u_S(t)$ 条件下的响应 $i(t)$ 可用卷积积分公式求出，即



RL 串联电路

$$i(t) = \int_0^t [\varepsilon(\tau)-\varepsilon(\tau-t_0)]\frac{1}{L}e^{-\frac{R}{L}(t-\tau)}\mathrm{d}\tau$$

$$= \frac{1}{R}(1-e^{-\frac{R}{L}t})\varepsilon(t) - \frac{1}{R}[1-e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)}]\varepsilon(t-t_0)$$

juece zhichi xitong

决策支持系统 （decision support system，DSS）

一种以计算机为工具，应用决策科学及有关学科的理论与方法，以人机交互方式辅助决策者解决半结构化和非结构化决策问题的信息系统。广义观点认为，任何能帮助决策者进行决策的系统都称为决策支持系统，按照这种观点，DSS也包括对结构化决策问题的支持。DSS是一门综合经济管理理论、决策科学、控制论、行为科学和计算机科学的边缘性科学，已广泛用于企业决策管理、战略研究与规划、经济分析和资源管理等部门。

功能结构　DSS的基本结构如图所示，主要由四个部分组成，即模型部分、推理部分、数据部分和人机交互部分。模型部分包括模型库和方法库及其管理系统，存储与所研究决策问题有关的模型与分析方法，如预测、决策模型，库存控制模型，回归分析方法等。推理部分由知识库、知识库管

DSS 基本结构

理系统和推理机组成，存放预估、分析、判断和推理等管理知识，使系统智能化。数据部分包括数据库及其管理系统，收集、存储、处理与决策目标相关的数据、背景资料，如竞争对手、新技术动态等。人机交互部分是 DSS 的人机交互界面，接收和校验用户请求，调用系统内部功能软件为决策服务，使模型运行、数据调用和知识推理达到有机统一，有效解决决策问题。

发展　DSS 的概念是美国学者 S. 莫顿（Scott Morton）于 20 世纪 70 年代首先提出的，在决策支持系统的初级阶段，DSS 是将大量的数据与多个模型组合起来，形成决策方案，通过人机交互达到支持决策的作用，称为初阶 DSS。20 世纪 90 年代初，结合了人工智能技术特别是专家系统以后，形成了智能决策支持系统（intelligent decision support system，IDSS），它采用定性和定量结合的方式辅助决策，是以模型、知识和数据结合的 DSS，也称传统决策支持系统。20 世纪 90 年代末期，兴起了以数据仓库（data warehouse，DW）为基础，结合联机分析处理（on-line analysis processing，OLAP）和数据挖掘（data mining，DM）的新决策支持系统（DW＋OLAP＋DM）。新决策支持系统具有以下特点：数据仓库和联机分析处理的数据组织方式是多维数据；数据仓库是为决策分析服务的；联机分析处理提供多维分析手段；数据挖掘是从数据中发掘出隐藏的知识。新决策支持系统与传统决策支持系统结合形成的综合决策支持系统，以及随着 Internet 发展形成的网络环境的综合决策支持系统是 DSS 的发展趋势。

jueyuan cailiao de changqi nairexing

绝缘材料的长期耐热性　（long-term thermal endurance of electrical insulating materials）　电气绝缘材料长期暴露于高温下的耐受能力。

国际电工委员会（IEC）和中国标准化委员会推荐以温度指数和相对温度指数表征绝缘材料的长期耐热性。温度指数是在热老化试验建立的耐热关系中对应于某个热寿命值（通常为 20 000h）的摄氏温度；相对温度指数是在被试材料和参考材料经受相同的老化和诊断试验的对比中，根据参考材料的已知温度指数及其对应的热寿命求得的被试材料的温度指数。

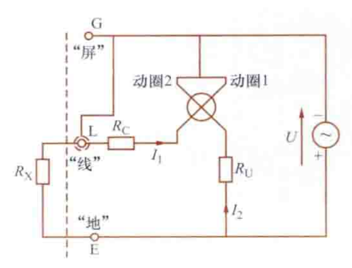
绝缘材料可能因采用不同的评定寿终参数而有不同的温度指数。

根据绝缘材料的功用，可选择不同耐热性的绝缘材料组成一定耐温等级的绝缘系统，即 Y（90℃）、A（105℃）、E（120℃）、B（130℃）、F（155℃）、H（180℃）及 200℃、220℃、250℃，超过 250℃每递增 25℃为一级。

jueyuan dianzubiao

绝缘电阻表　（insulation resistance meter）　测量绝缘电阻的电表。它的测量机构是磁电系流比计，标尺刻度以“兆欧”为单位，又称兆欧表或高阻表，旧称摇表。

绝缘电阻表的原理线路如图所示。固定在转轴上的两动圈共同处在永久磁铁产生的磁场中；电源电压 U 由手摇直流发电机或直流电压变换器产生；R_C、R_U 是附加电阻；R_X 是被测绝缘电阻。动圈 1 产生转动力矩 $M_1=f_1(I_1, \alpha)$，动圈 2 产生反作用力矩 $M_2=f_2(I_2, \alpha)$，当这两个力矩平衡时，测量机构可动部分的偏转角 $\alpha=f(I_1/I_2)$ 与两电流的比值 I_1/I_2 有关，而与电源电压 U 无关。这种测量机构也称磁电系流比计。对不同阻值的 R_X，I_1/I_2 的比值相应发生变化，从而给出不同的 α 角或电阻示值。



绝缘电阻表原理线路图

绝缘电阻表是检查电气设备或配电线路中相互绝缘的导电部分之间或导电部分与外壳之间绝缘电阻的测试工具。

对不同电气设备绝缘电阻的测量（见绝缘电阻测量），有不同的测试电压要求，因此应按相关规程规定的电气设备电压等级选用不同额定电压的绝缘电阻表。

选择绝缘电阻表的测量范围时，要使被测绝缘电阻的数值处在表盘上易于读取数据的部分，且为减小读数误差，应尽量避免读数处在表盘下限或上限刻度密集处。

当被测试品表面漏电严重时，可将绝缘电阻表的 G（或“屏”）接线柱与试品上的屏蔽环或屏蔽端相连，使漏电流不经过测量机构直接流回发电机的负极，以避免由表面漏电流引起的测量误差。

用绝缘电阻表测量绝缘电阻时，为消除试品充电电流对读数的影响，一般需加电压 1min 后再读数。对大电容试品，须等到指针稳定后方可读数。

jueyuan dianzu celiang

绝缘电阻测量　（insulation resistance measurement）　对绝缘结构或绝缘材料在直流电压下呈现的高电阻值进行测量，是检测绝缘是否存在贯通的集中性缺陷、整体受潮或贯通性受潮的一种试验手段。通常使用绝缘电阻表（又称兆欧表）进行测量，对 $10^{14}\sim10^{18}\,\Omega$ 的高绝缘电阻试样需要在实验室中用高阻计测量（见绝缘电阻率试验）。

兆欧表测量的是被试绝缘体在直流高压下的泄漏电流值，在表盘上以兆欧值的形式反映出来。按产生的电压可分为 100、250、500、1000、2500、5000V 六种规格；按结构可分为手摇式、晶体管式和数字式三种形式。应按照有关规程要求，选用不同电压等级的兆欧表。对于手摇式兆欧表（俗称摇表），要持续摇动发电机，维持转速约为 120r/min。

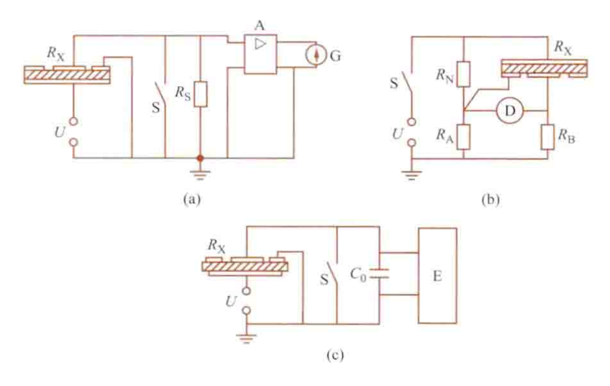
测量绝缘电阻应记录试品的温度。有关规程虽提供了绝缘电阻的温度换算计算式，但此计算式的准确度并不高，因此希望尽可能在相近温度下进行测试，以减少由于温度换算引起的误差。

由双层或多层电介质构成的绝缘，在开始施加直流电压时，电场按介质的介电常数分布，经一段时间后到达稳态，变为按电导率分布。这个过渡过程称为吸收过程，可用吸收比来表征，即60s和15s时测得的绝缘电阻的比值。对吸收过程较长的设备，应用极化指数来表征吸收过程，它是10min和1min绝缘电阻的比值。吸收比或极化指数的降低说明绝缘可能受潮。

jueyuan dianzulü shiyan

绝缘电阻率试验 (test for insulation resistivity) 测量绝缘材料体积电阻率和表面电阻率的试验。材料的绝缘电阻率是用来比较各种绝缘材料绝缘性能的重要参数。

测量原理 绝缘体积电阻和表面电阻的测量方法有直测法、比较法以及充电法。直接法常用高阻计测量，比较法常用电桥测量，充电法则用静电计测量，分别如图(a)、图(b)和图(c)所示。直接法最方便，比较法最准确，充电法最灵敏。



绝缘电阻测量原理图

(a) 直接法-高阻计测量；(b) 比较法-电桥测量；(c) 充电法-静电计测量

U—直流电源电压；R_X—被测电阻；R_N—标准电阻；S—开关；R_A、R_B—桥臂电阻；R_S—标准电阻；A—直流或调制放大器；C_0—标准电容器；E—静电计；G—电流指示器；D—平衡指示器

用高阻计测量可直读电阻值。用电桥测量，当电桥平衡时，被测电阻值 $R_X = R_N \dfrac{R_A}{R_B}$，式中 R_N、R_A、R_B 见图(b)。用静电计测量，当充电电流不变时，被测电阻值 $R_X = \dfrac{ut}{C_0 u_e}$，式中 t 为充电时间；u_e 为静电计读数；u、C_0 见图(c)。

体积电阻率ρ_V或表面电阻率ρ_S可根据测得的体积电阻R_V或表面电阻R_S的值和试样电极的形状及尺寸通过计算获得。例如对于平板试样，其计算公式为

$$\rho_V = R_V \frac{A}{d}, \rho_S = R_S \frac{l}{d}$$

式中 A 为电极有效面积；l 为电极长度；d 为试样厚度(测ρ_V)或电极距离(测ρ_S)。

试样和电极 按材料类型，平板、薄膜、管试样，一般采用三电极系统，常用粘贴铝箔、导电橡皮、真空蒸铝、烧银等制作电极，视被测材料选用。

测试时的注意事项 为获得准确数据，应注意：

(1) 试验前对材料应作预处理，试验应在标准条件下进行，以消除温度、湿度及污染等影响。

(2) 测量前，试样短路放电时间至少4倍于前一次测量的充电时间，以消除残余电荷。

(3) 注意观察在试样上加压前与去除电压后检测仪器的偏转值是否相等，确保线路中无杂散电动势。

(4) 采用保护技术，消除漏电流的影响。

(5) 在规定的电极化时间(1min)下读出电阻值，以减少极化电流的影响。

jueyuan qiti

绝缘气体 (insulating gaseous) 能使有电位差的电极间保持绝缘的气体。气体绝缘遭破坏后有自恢复能力，它具有电容率稳定、介质损耗极小、不燃、不爆、化学稳定性好、不老化、价格便宜等优点，是极好的绝缘材料。可供应用的绝缘气体列于表中。

气体的绝缘特性服从巴申定律 $U_d = f(pd)$，即击穿电压 U_d 是间隙距离 d 和气压 p 乘积的函数，见图1。压力的增大和减小都能提高气体的击穿电压。

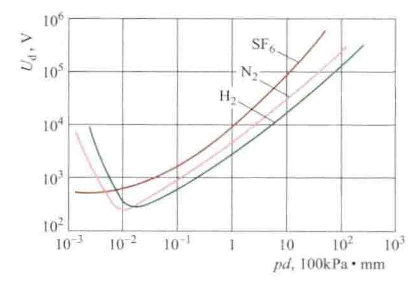


图1 气体的绝缘特性

作为高压装置的外绝缘材料，空气应用最广。它的电气强度与电场分布和电压波形有关，图2为极不均匀电场在标准大气压条件下的情况。如偏离标准条件应按规定修正。

作为高压装置的内绝缘材料，六氟化硫(SF_6)用得最普遍。SF_6具有六个氟原子围绕中心一个硫原子的分子结构，其键合距离小，键能高，化学稳定性好，离解温度在1000K以上。它属电负性气体，极易吸附自由电子而削弱电离过程，因此电气强度很高，灭弧能力约为空气的100倍，所以它兼有绝缘和灭弧的双重性能，在高压断路器中应用很广。20世纪60年代后发展了充高气压SF_6的气体绝缘金属封闭开关设备。它占用空间小，运行不受环境影响，已被用于超高压变电站及城市配电网中。充SF_6的同轴管道可取代充油电缆用于高落差场合，SF_6绝缘变压器具有防火防爆的优点，适用于高

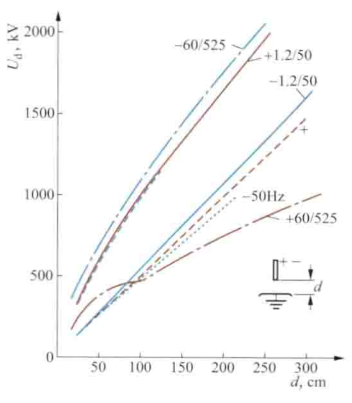


图2 空气的击穿特性
(标准大气压条件下)

层建筑。

SF_6本身无毒，在电弧或电晕作用下会生成一些具有毒性的低氟化合物。SF_6对含硅材料如玻璃、电瓷有腐蚀性，当它含有水分时，分解物的腐蚀性更强。此外，SF_6在不均匀电场中电气强度大为降低，这些均应在实际运行中加以重视。

用作气体绝缘材料的还有氟里昂、氮、二氧化碳等。

不同绝缘气体的物理特性（气压 0.1MPa，温度 0℃）

气体种类	符号	击穿场强 E①、② (kV/cm)	相对分子量 M	密度 d (kg/m^3)	电子自由行程 λ_E (μm)	电离能 W_i (eV)	凝聚点 θ_k (℃)
氢气	H_2	15	2	0.09	0.65	15.8	−243
二氧化碳	CO_2	25	45	1.91	0.24	14.4	−29
空气	—	32	(29)	1.25	0.37	—	−193
氮气	N_2	33	28	1.21	0.35	15.7	−196
一氧化碳	CO	42	28	1.24	0.36	14.1	−192
氟里昂	CF_2Cl_2	80	121	5.33	0.30	≤18.0	−28
六氟化硫	SF_6	89	146	6.39	0.22	15.9 19.3	−63
四氯化碳	CCl_4	180	154	6.65	0.08	11.1	+77

① 参考值，不同文献所列大小相差很大。

② 系板-板电极间距 1cm 的击穿场强值。

jueyuanshan changxiaoying gonglü jingtiguan

绝缘栅场效应功率晶体管

（insulated gate field-effect power transistor） 具有垂直于芯片表面的导电路径的功率 MOSFET，是 20 世纪 80 年代发展起来的一种全控型电力电子器件。

基本结构 场效应管的导电沟道分为 P 沟道和 N 沟道。当栅极电压为零时漏源极之间存在的导电沟道称为耗尽型；对于 N（P）沟道器件，栅极电压大（小）于零时才存在的导电沟道称为增强型。在功率 MOSFET 中，主要是 N 沟道增强型，且大都采用了垂直导电结构，又称 VMOSFET（vertical MOSFET）。根据垂直导电结构的差异，分为 VVMOSFET（vertical v-groove MOSFET）和 VDMOSFET（vertical double-diffused MOSFET）两种基本类型。

VVMOSFET 一种采用纵向（垂直）导电沟道，用大规模集成电路技术将许多小 MOS 管管芯并联起来，以扩大漏极电流及功率容量的场效应半导体器件。其结构示意图如图 1 所示。它是在硅片上刻蚀出一定宽度、深度和长度的 V 形槽，然后把器件作在槽的两壁而成，充分利用了硅片面积，降低了体电阻数值。一般小功率场效应管输入阻抗较高，但带负载的能力很低；一般大功率晶体管能输出较大的功率，但由于输入阻抗较低，输入端需要较大的推动电流才能工作，因此还要有较复杂的推动级。VVMOSFET 管兼有上述两种管子的优点，用这种器件设计的电路系统比较简单。

VDMOSFET 具有垂直导电的双扩散 MOS 结构的场效应功率晶体管。它是利用同一扩散窗进行两次扩散形成 N^+PN^- 结构，由两次扩散的深度差形成沟道部分，从而使沟道的长度可以精确控制，约 1μm 左右。电子流在沟道内沿表面流动，然后垂直地流向漏极。由于漏极也是从硅片底部引出，所以器件可以高度集成化。与 VVMOSFET 相比，VDMOSFET 在高集成度、高耐压、低结电容和高速性能等方面都得到了大幅度改进和提高。图 2 所示 VDMOSFET 的基本结构，实际的器件往往由数万个以上的单元组成，并且在结构上是立体交错互联的。

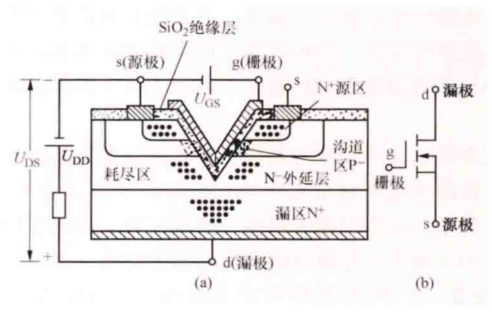


图 1 VVMOSFET 的结构和图形符号

(a) 结构示意图；(b) 图形符号

工作原理 与普通 MOSFET 基本相同，见绝缘栅场效应晶体管。

主要参数 与普通 MOSFET 基本相同，其中通态电阻和极间电容分别对器件的导通状态和开关状态特性起着关键性作用。

通态电阻 当功率 MOSFET 工作在导通状态时，器件沟道的行为就像一个恒定的电阻，其阻值在器件额定电流下几乎不随工作电流的变化而变化。通态电阻数值的大小决定了器件的通态损耗。功率 MOSFET 的通态电阻随着温度上升而增大，会使通态电流减小，从而在电流和温度之间保持一种负反馈关系，保证了电流在芯片内的均匀分布。

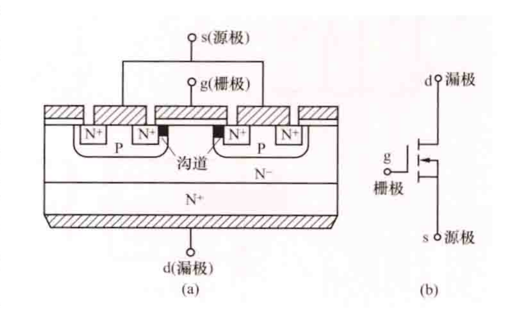


图 2 VDMOSFET 的结构示意图

(a) 结构示意图；(b) 图形符号

极间电容 包括栅源电容、栅漏电容和漏源电容，主要由功率 MOSFET 的绝缘层形成。不同型号器件在相同偏压下的电容大小有很大差别，对器件的特性起着决定性的作用。

安全工作区 功率 MOSFET 的开关频率高，常处于动态过程中，其安全工作区分为正向偏置安全工作区、开关安全工作区和换向安全工作区三种情况。

典型特征 和普通大功率晶体管相比，绝缘栅场效应功率晶体管优点是：高输入阻抗，低驱动功率，适合于高频高速工作，负的电流温度系数。

（1）高输入阻抗：输入阻抗为 $10^9 \sim 10^{11}\,\Omega$，其输入端能直接与 CMOS、TTL 集成电路（见集成逻辑门电路）和其他高阻抗器件连接。

（2）低驱动功率：工作时的输入电流甚微（0.1μA 以下），

因此器件的驱动功率很小，属电压控制器件。单个功率MOSFET经常可用来代替由两三只普通晶体管组成的复合管。

(3) 适合于高频高速工作：属于单极型电子器件，没有普通晶体管所固有的少子存储效应，开关时间短，开关损耗小。

(4) 负的电流温度系数：在栅源电压不变的情况下，导通电流会随温度的上升而下降（普通晶体管正相反），因而功率MOSFET不存在二次击穿引起管子损坏的现象，特别适合于做大功率器件。

绝缘栅场效应功率晶体管所具有的优越性能，已使它用在很多方面，如用于CMOS、TTL接口电路、高速开关、开关电源、直流转换、射频功放、高级音响系统、线性放大、电动机驱动等。

jueyuanshan changxiaoying jingtiguan

绝缘栅场效应晶体管 (insulated gate field-effect transistor) 具有一个或多个在电气上与沟道相互绝缘的栅极的场效应半导体器件。绝缘栅场效应晶体管是利用半导体表面的电场效应进行工作的。由于它的栅极处于绝缘状态，所以输入电阻极高，可达 $10^{15}\ \Omega$。它和结型场效应晶体管的不同之处在于导电机理和电流控制原理不同。结型场效应晶体管利用耗尽层的宽度变化来改变导电沟道的宽窄，达到控制漏极电流的目的。绝缘栅型场效应晶体管则利用半导体表面的电场效应，由感应电荷的多少来改变导电沟道的宽窄，以达到控制电流的目的。绝缘栅场效应晶体管中，常用二氧化硅（SiO_2）作为金属栅极和半导体之间的绝缘层即金属-氧化物半导体，简称MOS (metaloxide-semiconductor) 管，因此绝缘栅场效应晶体管又称MOSFET。

分类 MOS管可被制成N沟道或P沟道，增强型或耗尽型四种类型。增强型是在栅源电压 $u_{GS}=0$ 时，漏源之间没有导电沟道；反之，在 $u_{GS}=0$ 时，漏源之间存在导电沟道的称为耗尽型。

N沟道增强型MOS管 图1是这种管子的结构示意图。它以一块杂质浓度较低的P型硅片为衬底B，在其中扩散两个 N^+ 区作为电极，分别称为源极s和漏极d。半导体表面覆盖 SiO_2 绝缘层，在漏源之间的绝缘层上再制造一层金属铝，称为栅极g。栅极与源极、漏极之间均是绝缘的。

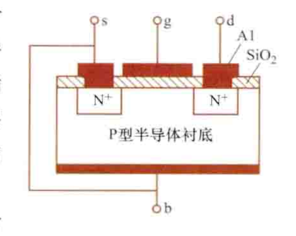


图1 N沟道增强型场效应管的结构示意图

MOS管的衬底和源极通常是接在一起的。从图2中可看出，漏源之间有两个背向的PN结，当栅源电压 $u_{GS}=0$ 时，若漏源电压为正，漏极与衬底之间的PN结加的是反向偏压，漏极与源极之间不可能形成导电沟道，因此，漏极电流 i_D 等于零。

当栅源电压 u_{GS} 为正向小电压时，在 SiO_2 的绝缘层中，产生一个垂直于半导体表面、由栅极指向P型衬底的电场。这个电场排斥空穴而吸引电子，使靠近 SiO_2 一侧P型材料中的空穴被排斥，形成耗尽层。当栅源电压 u_{GS} 增大到一定值后，则在P型材料的表面感应出许多自由电子，形成一个N型薄层，如图2所示。这个在P型材料中形成的N型层，称为“反型层”，构成了漏源之间的导电沟道，其厚度随着栅源电压 u_{GS} 进一步增大而增加。当漏源之间形成导电沟道后，如果加上正的漏源电压 u_{DS}，便产生漏极电流 i_D。在漏源电压作用下，开始产生漏极电流 i_D 时的栅源电压称为开启电压 $U_{GS(th)}$。由于这类场效应晶体管仅当 $u_{GS}>U_{GS(th)}$ 后才出现漏极电流 i_D，故称为“增强型”。

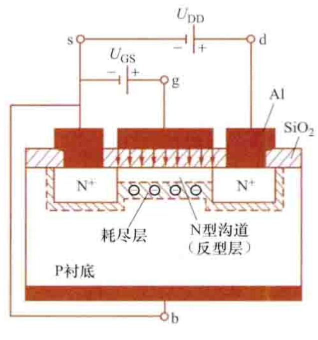


图2 N沟道增强型绝缘栅场效应晶体管的工作原理

图3 (a)、(b) 分别是N沟道增强型MOS管的漏极特性和转移特性曲线。漏极特性曲线分为可变电阻区、恒流区和夹断区三部分。转移特性曲线是 u_{DS} 使管子工作在漏极特性曲线恒流区时所对应的 $i_D=f(u_{GS})$ 曲线（可变电阻区对应的曲线未画出）。

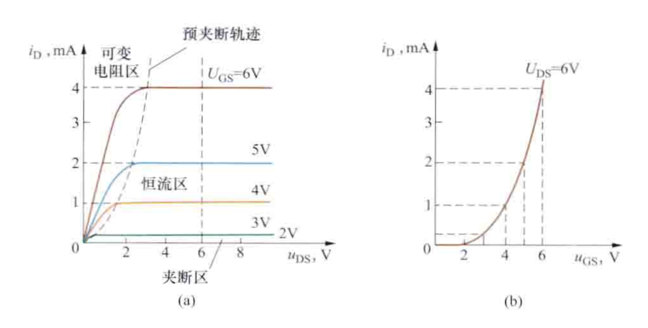


图3 N沟道增强型MOS管的特性曲线
(a) 漏极特性曲线；(b) 转移特性曲线

与结型场效应晶体管相似，也可以给出 i_D 与 u_{GS} 的近似关系式

$$i_D=I_{DD}\left[\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}}-1\right]^2 \qquad [u_{GS}>U_{GS(th)}]$$

式中 I_{DD} 是 $u_{GS}=2\,U_{GS(th)}$ 时的 i_D 值。

N沟道耗尽型MOS管 这种管子在制造过程中，在 SiO_2 绝缘层中掺入大量的正离子。在 $u_{GS}=0$ 时，在这些正离子产生的电场的作用下，P型衬底表面已经出现反型层，即漏源之间存在有导电沟道。u_{GS} 为正时，沟道加宽，i_D 增大；u_{GS} 为负时，沟道变窄，i_D 减小。当 u_{GS} 减小到一定值（负值）时，反型层消失，漏源之间失去导电沟道，此时的 u_{GS} 称为夹断电压 $U_{GS(off)}$。由于这种管子的 u_{GS} 在一定范围内正负值均可控制 i_D 的大小，故它比结型场效应晶体管使用更方便。

P沟道增强型或耗尽型MOS管 如果在制造时，把衬底改为N型，漏极与源极为 P^+ 型，则可构成P沟道增强型或耗尽型场效应管，其工作原理与N型沟道场效应管相同。使用时 U_{GG}、U_{DD} 的极性应与N沟道MOS管相反。

四种MOS管的符号和特性曲线均见图4中。图中，场效应管各极附近标出的⊕、⊖符号，表示正常使用时需施加的电源极性。

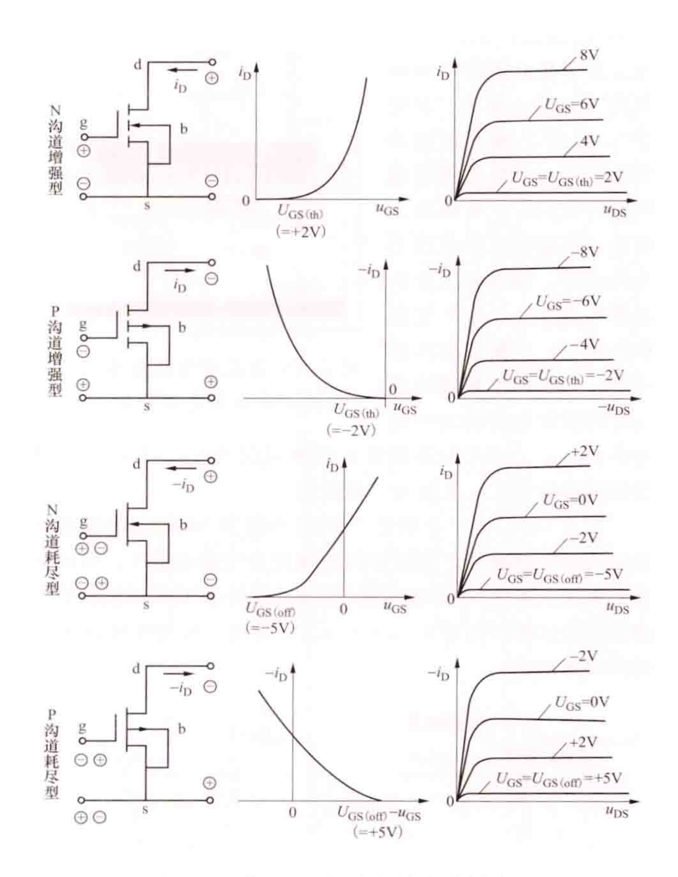


图 4　四种 MOS 场效应管的特性曲线

MOS 管在使用时衬底和源极通常是接在一起的，如果需要分开，则衬源间的电压u_{BS}必须保证衬源间的 PN 结是反向偏置，即 NMOS 管的U_{BS}为负，PMOS 管的U_{BS}为正。

主要电参数　MOS 管有 9 个主要电参数。

（1）开启电压$U_{GS(th)}$：在u_{DS}为某一固定值的条件下能产生i_D所需要的最小$|u_{GS}|$值。

（2）夹断电压$U_{GS(off)}$：在u_{DS}为某一固定值的条件下，使i_D等于某一微小电流（便于测量）时所对应的u_{GS}值。

（3）零偏漏极电流I_{DSS}：在$u_{GS}=0$的条件下，当$u_{DS}>U_{GS(off)}$时的漏极电流。

（4）直流输入电阻$R_{GS(DC)}$：栅源电压和栅极电流的比值。

（5）低频跨导g_m：在u_{DS}为某一固定值的条件下，i_D的微小变化量和引起它变化的u_{GS}的微小变化量之间的比值，即

$$g_m=\left.\frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}}\right|_{u_{DS}=\text{常数}}$$

式中g_m的单位为 S 或 mS。

（6）极间电容：场效应管的三个电极之间存在极间电容，即栅源电容C_{GS}、栅漏电容C_{GD}和漏源电容C_{DS}。C_{GS}、C_{GD}的数值一般为 1～3pF，C_{DS}约为 0.1～1pF。管子用于高频电路时，要考虑这些电容的影响。

（7）最大漏极电流I_{DM}：管子在工作时允许的最大漏极电流。最大耗散功率P_{DM}是决定管子温升的主要参数。

（8）漏源击穿电压$U_{(BR)DS}$：在增加漏源电压u_{DS}时，使i_D开始剧增时所对应的u_{DS}值。

（9）栅源击穿电压$U_{(BR)GS}$：使栅极电流急剧增加时所对应的栅源电压u_{GS}值。

MOS 场效应管的输入电阻极高，因此，由外界静电感应所产生的电荷不易泄漏，而栅极上的 SiO_2 绝缘层又很薄，将在栅极上产生很高的电场强度，以致引起绝缘层击穿而损坏管子。为此，管子在存放时，应将各极引线短接。焊接时，要将电烙铁外壳接上可靠地线，或者在焊接时，将电烙铁与电源暂时脱离。目前，常在 MOS 管输入端加置保护措施。保护方法很多，但原理都一样，就是在输入端与栅极之间设置一个串联限流电阻和一个并联的钳位保护电路。图 5 所示是常用的一种保护电路。当发生过电压时（无论是正向还是反向），V1 或 V2 中总有一只管子呈稳压状态，电流通过 R 产生电压降，从而限制了加在 g、s 间的正、负方向的电压，起到保护管子的作用。

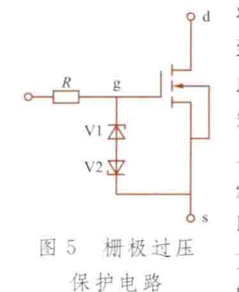


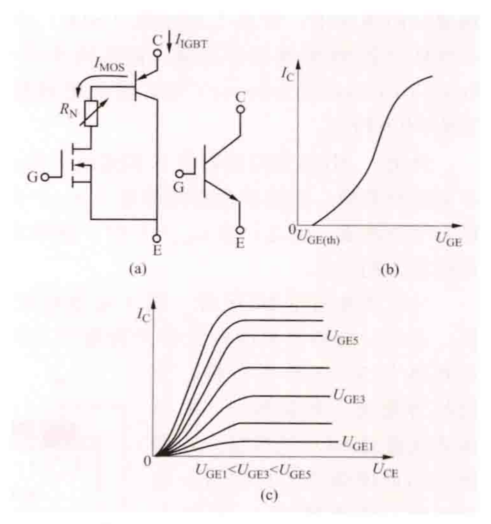
图 5　栅极过压保护电路

jueyuanshan shuangjixing jingtiguan

绝缘栅双极型晶体管

（insulated gate bipolar transistor，IGBT）　一种兼有 MOSFET 低驱动功率和双极型晶体管低通态压降优点的混合功率器件，又称绝缘门极双极型晶体管。

工作原理　IGBT 的等效电路、图形符号如图（a）所示，图（b）、（c）分别为其转移特性和输出特性。IGBT 的输入驱动级为 N 沟道增强型绝缘栅场效应晶体管 MOSFET，输出级为电力晶体管（GTR），形成达林顿晶体管电路结构，相当于由 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 晶体管。事实上，IGBT 比 VD-MOSFET 仅多一层 P^+ 注入区，形成一个大面积 P^+N 结，使得 IGBT 导通时可由 P^+ 注入区向 N 基区发射少数载流子（空穴），对漂移区电导率进行调制。因此 IGBT 是 MOSFET 和 GTR 的复合。它兼有 MOSFET 高输入阻抗、快开关速度和 GTR 的高电流密度、低通态压降的优点。此外，IGBT 的开关损耗小，只有 GTR 的 1/10，与功率 MOSFET 相当。安全工作区比 GTR 大，且具有耐脉冲电流冲击的能力。自 1986 年开始实际使用以来，迅速成为中、大功率电力电子设备的主导器件，是电力电子技术领域中发展最快、应用最广的功率开关器件。



IGBT 等效电路、图形符号和特性曲线
（a）等效电路、图形符号；（b）转移特性；（c）输出特性

IGBT的封装主要有单管形式和基板与各电极绝缘的模块形式。大功率的IGBT也有平板压接式。由于模块形式的IGBT便于散热器的设计，被各生产厂家普遍采用。

IGBT的驱动原理与功率MOSFET基本相同，其导通和关断是由栅极电压U_{GE}控制的。图（b）描述的是集电极电流I_C与栅射电压U_{GE}之间的关系，与功率MOSFET的转移特性类似。当栅极电压U_{GE}大于N沟道MOSFET的阈值电压（开启电压）$U_{GE(th)}$时，MOSFET导通，从而给PNP管提供基极电流而使其导通；当栅极电压小于$U_{GE(th)}$时，MOSFET关断，PNP管无基极电流流过而截止。图（c）所示为IGBT的输出特性，也称伏安特性，它描述的是以栅射电压为参考变量时，集电极电流I_C与集射极电压U_{CE}之间的关系。IGBT的输出特性曲线分为三个区：正向阻断区、有源区和饱和区。在电力电子电路中，IGBT工作在开关状态，因而是在正向阻断区和饱和区之间来回转换。当IGBT导通时，工作在特性曲线电流上升区域，U_{GE}增大时，U_{CE}值减小。为使通态压降U_{CE}低，通常选择U_{GE}值为10～15V，此情况下通态压降接近饱和值。U_{GE}值影响短路破坏耐量（时间），耐量值为微秒级，U_{GE}值增加，短路破坏耐量（时间）减少。栅极电阻的取值影响开关时间，阻值大，开关时间增加，单个脉冲的开关损耗增加。阻值减小时，di/dt增大，可能会导致IGBT误导通。

主要参数　I_{CM}为集电极额定最大直流电流；$U_{(BR)CES}$为栅极短路时的集-射极击穿电压；P_{CM}为额定的最大耗散功率；$U_{CE(sat)}$为集—射极间的饱和压降；$I_{CE(s)}$为栅极短路时集电极最大关断电流；R_{th}为结壳间的最大热阻；T为最高工作温度。IGBT的击穿电压与通态压降和关断时间参数之间存在矛盾，高压器件由于具有较高的电阻率，将引起通态压降的增大和关断时间的延长。在实际应用中，要根据情况合理选择器件参数。关断过程中，集射极电压U_{CE}的变化情况与负载的性质有关。在感性负载的情况下，U_{CE}会突然上升而产生过冲，IGBT将承受较高的du/dt，必要时应采取措施加以克服。此外，IGBT结温升高时，集电极电流的下降时间和集射极电压的上升时间均随之延长，引起关断损耗增加。因此，为IGBT提供良好的散热条件是有效利用器件、减少损耗的关键。

安全工作区　反映IGBT同时承受一定电压和电流的能力，有正向偏置安全工作区和反向偏置安全工作区两种。

（1）正向偏置安全工作区：根据最大集电极电流、最大集射极间电压和最大集电极功耗确定IGBT在导通工作状态的参数极限范围。最大集电极电流是根据避免器件发生动态擎柱效应而设定的。IGBT一旦发生擎柱效应，器件失控，集电极电流增大，造成过高的功耗，导致器件损坏。最大集射极间电压是根据IGBT中P^+N^-P晶体管的击穿电压确定的。最大集电极功耗由器件最高允许结温决定。

（2）反向偏置安全工作区：根据最大集电极电流、最大集射极间电压和最大允许电压上升率du_{CE}/dt确定IGBT在阻断工作状态下的极限参数范围。过高的du_{CE}/dt会使IGBT产生动态擎柱效应。du_{CE}/dt越大，反向偏置安全工作区越小。

发展　表中列出了各代IGBT器件的典型特性参数。IGBT发展非常迅速，正在向高频、高压、大电流以及降低器件的开关损耗和通态损耗方向发展。已研制出3200V/1300A（德国EUPEC公司）的IGBT。IGBT器件额定电压和额定电流所覆盖的输出容量已经达到4MVA。由于IGBT特性参数优越，已成为工业领域应用最广泛的电力电子器件。

各代IGBT器件的典型特性参数表

第几代	单管				模块			
	电流/电压 I_c/U_{cc}(A/V)	通态压降 $U_{CE(sat)}$(V)	频率(kHz)	开关时间(μs)	电流/电压 I_c/U_{cc}(A/V)	通态压降 $U_{CE(sat)}$(V)	频率(kHz)	开关时间(μs)
1	25/1000	3～3.5	5	1	200/1000	3～3.5	5	1
2	50/1600	2.5～3.0	20	0.5	500/1600	2.5～3.0	20	0.5
3	600/1800	1.5～2.2	50	0.2	1200/3500	1.5～2.2	50	0.2

jueyuan zhenduan jishu

绝缘诊断技术　（insulation diagnosis）　通过对绝缘的试验和各种特性的测量，了解绝缘特征，评估绝缘在运行中的状态，从而早期发现故障的技术。电力设备绝缘在运行中受到电、热、机械、环境等各种因素的作用，其性能将逐渐劣化，以致出现缺陷，造成故障，引起供电中断。绝缘诊断技术的目的就是早期发现故障。推行并发展绝缘诊断技术可显著提高电力设备及电力系统的运行可靠性，从而带来明显的经济效益。

诊断流程　绝缘诊断包括三个基本环节：①选用各种传感器及测量手段，检测或监测最能表征被试对象状态的各种特性，得到初始模式；②对原始的杂乱信息加以分析处理（数据处理），去除干扰，提取反映被试对象运行状态最敏感、最有效的特征参数，形成待检模式；③将待检模式与样板模式（根据绝缘老化的知识、运行经验以及积累的故障模式确定）进行对照，对绝缘的运行状态进行识别、判断，对其发展趋势进行预测，从而提供故障预警，并能为下一步设备维修决策提供技术根据。

诊断技术有离线和在线之分。离线诊断要求被试设备退出运行状态，通常周期性间断施行。其缺点是：①需停电进行，而不少重要电力设备轻易不能停止运行；②只能周期性进行而不能连续地随时监视，而绝缘有可能在诊断间断期间发生故障；③停电后的设备状态（如作用电场、温升等）和运行中的不符，影响诊断准确性。在线诊断的特点是可以对设备在运行状态下进行连续监测和判断，故可避免离线诊断的上述缺点，使判断更加准确。随着传感、信息处理及电子、计算机技术的进步，在线诊断技术也得到迅速发展。在线诊断技术的不足是通常投资较大，故适用于大型重要设备及变电站。

绝缘诊断过程流程示意图见图1。

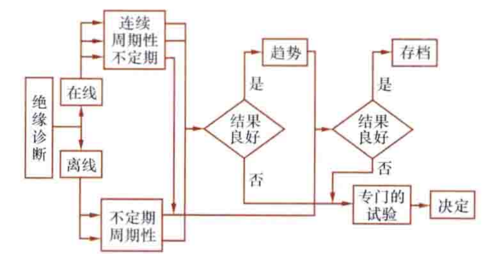


图1　电力设备绝缘诊断过程流程示意图

绝缘特性试验 诊断过程中为了对绝缘状态作出判断，需对绝缘进行各种试验，也称绝缘预防性试验。试验可分为两大类：①破坏性试验，即耐压试验；②非破坏性试验。耐压试验对绝缘的考验严格，能保证绝缘具有一定的绝缘水平或裕度；缺点是只能离线进行，并可能在试验时给绝缘造成损伤。非破坏性试验是在较低电压下或用其他不会损伤绝缘的方法测量绝缘的各种特性，从而判断绝缘内部的缺陷。实践证明，这类方法是有效的。其缺点是对绝缘耐压水平的判断比较间接，尤其对于周期性的离线试验更不易判断准确。两类试验是相辅相成的。耐压试验往往是在非破坏性试验之后才进行，而如果非破坏性试验已表明绝缘存在不正常情况，则必须在查明原因尽量加以消除后再进行耐压试验，以避免发生不应有的击穿。在线诊断采用的是非破坏性试验方法，由于可连续监测，除测定绝缘特性的数值外，还可分析特性随时间的变化趋势，从而显著提高其判断的准确性。

做破坏性试验即耐压试验时，可一并进行泄漏电流测量、交流电流激增点试验等。

非破坏性试验包括：①绝缘电阻测量；②电容率与损耗因数试验；③绝缘不平衡电流试验；④局部放电试验；⑤绝缘油的气相色谱分析等。

依据规则的诊断分类 由于绝缘的特征及其状态一般不是一一对应的，因而要根据研究和经验，建立一定的诊断规则。根据诊断规则的不同可将诊断分为三类：①逻辑诊断；②模糊诊断；③统计诊断。

逻辑诊断 逻辑诊断中将特征只归结为“有”和“无”两种（若特征参数大于某给定的阈值则为“有”特征，否则为“无”），诊断对象的状态同样只归结为“有”和“无”，或“好”和“坏”两种，即特征和状态均采用二值逻辑量来描述。逻辑诊断简单明了，应用较广，但把问题过于简化，诊断精确度较低。

模糊诊断 考虑到被试对象的特征及状态评价的主观不确定性，即模糊性，许多情况不能简单地用“有”、“无”和“好”“坏”来评定。模糊诊断中被试对象的特征和状态不用二值逻辑量描述，而用多值逻辑的特征函数来描述，如某特征“很强”“强”“一般”“弱”“很弱”，某故障“严重”“较严重”“一般”“轻微”“无”等，然后按特征或状态参数的取值量确定归入某一类别。如采用连续变化的隶属度函数，判断可更加精确。

统计诊断 统计诊断考虑到被试对象特征参数分布的不确定性，即统计性，对于处于同样状态的同类设备，其特征参数并不相同，而按一定的统计规律分布。如图2所示，完好绝缘1和损坏绝缘2的某些特征参数 x 的概率密度曲线分别为 $f_1(x)$ 及 $f_2(x)$，均值分别为 $\bar{x}_1$ 及 $\bar{x}_2$。如 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 是完全分离的［图2（a）］，则可在 a、b 区间选择一点作为阈值 x_0，当 $x \leqslant x_0$ 时，判定绝缘状态正常，当 $x > x_0$ 时，判定绝缘损坏。x_0 接近 a 值，则偏于安全，接近 b 值则反之。但大多数情况下，$f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 是重叠的［图2（b）］，此时不论怎样确定 x_0 都有发生虚警（x_0 右边的阴影面积）和漏判（x_0 左边阴影面积）的可能。虚警及漏判都会造成损失。为提高诊断的确诊率也需付出如添置设备及增加人员等代价。统计诊断要在考虑到上述各种因素后确定合适的诊断规则，使损失最小。

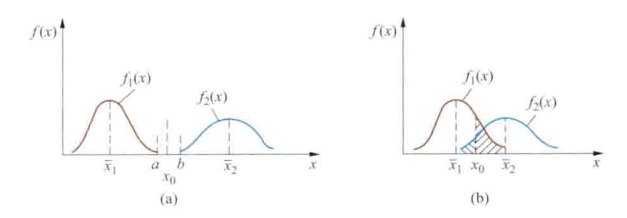


图2 某特征参数的概率密度曲线

(a) 绝缘完好和损坏时概率密度曲线不重叠；(b) 两者重叠

模糊诊断和统计诊断的精确度较高，但方法复杂，还在研究发展之中。绝缘诊断中主要仍采用逻辑诊断。

依据样板的诊断分类 在将待检模式与样板模式对比时，根据所用样板模式的不同，可将诊断分为：①阈值诊断；②时域波形诊断；③频率特性诊断；④指纹诊断。

阈值诊断 对设备进行测试，按照所得特征量是否超过规定阈值来判断设备状态的方法。电气设备的预防性试验主要属于阈值诊断范畴，电气设备一些特征量的阈值在中国电力行业标准中作了规定。阈值诊断比较简单，容易推行，但可能出现判断不够全面等缺点。当设备的特征与状态间的关系比较复杂时，借助逻辑运算，有利于作出阈值诊断。对特征量还可由趋势预测进行诊断，即根据特征量随时间的变化趋势来判断设备状态。

时域波形诊断 对设备进行测试，将测得的某种物理量随时间变化的曲线与样板对照来判断设备状态的方法。例如，根据局部放电脉冲信号的波形进行的诊断就属于时域波形诊断。

频率特性诊断 对设备进行测试，根据测得的设备的频率特性，或将测得的某种物理量的频谱与样板对照来判断设备状态的方法。以电力变压器绕组变形的诊断为例进行说明。当频率超过1kHz时，变压器绕组的电感、纵向电容、对地电容等组成了一个无源、线性的二端口网络，可以用传递函数 $H(j\omega)$（频率响应）来描述其特性。当变压器绕组发生变形后，单位长度绕组的电感、纵向电容、对地电容也会变动，其频响特性随之改变。通过比较变压器绕组的频响特性可诊断绕组是否存在变形。

指纹诊断 对设备进行测试，对测得的数据进行处理，将得到的某种特殊图形（指纹）与样板对照来判断设备状态的方法。以设备的局部放电为例进行说明。应用局部放电计算机测量装置可测得较长时间段内，每次放电的放电量 q，放电发生时的工频电压相位 φ，以及放电重复率 n。对所得 φ、q、n 信息进行整理，画出三维 $\varphi-q-n$ 谱图（图3），得到指纹。将这些指纹与样板对比，可比较全面地诊断设备状态。

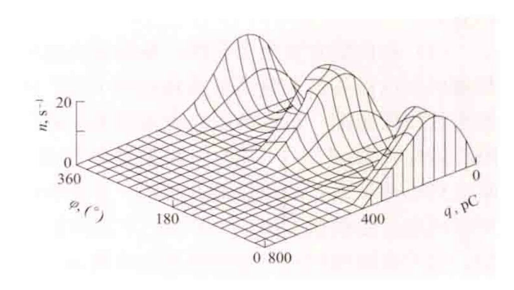


图3 放电三维谱图

对时域波形、频率特性、指纹可用目测判断（目测诊断）。目测诊断的准确度在很大程度上取决于操

作人员的经验，为避免这一缺点，可由这些图形提取出一些特征参数，然后根据参数进行诊断（参数诊断）。使用人工神经网络和基于距离的模式归类法等模式识别方法，可进一步提高诊断的可靠性和人工智能程度。

计算机监测与诊断系统 采用计算机进行自动监测与诊断可保证判断的客观性与可靠性，并能提高工作效率，特别适合于在线诊断。一般包括以下组成部分：①传感器；②数据采集；③计算机；④输出结果及报警；⑤数据传输与通信。为了抑制现场电磁干扰，可采用光纤传输信号。系统复杂程度的差别可以很大。最简单的是由便携式数据采集器和计算机组成的可分离的联机系统，数据采集器由计算机输入测试程序后携带到现场进行测试，测试完毕后再将数据输入计算机储存并进行处理。这种系统只能进行定期检测诊断。以单片机为核心，结合传感器、多路开关、模糊转换、微型打印机和固化在可编程序存储器中的软件等可组成最简单的连续监测诊断系统。采用单台计算机代替单片机，可以提高系统的分析诊断功能。面向多台设备乃至整个变电所的连续监测系统，可采用由多台计算机通过网络联系组成的分级管理形式（图4）。功能较强的主计算机负责整个系统的管理、控制和诊断，各个辅助计算机分别承担不同设备的数据采集及初步诊断。主计算机与各辅助计算机通过网络进行通信联络。

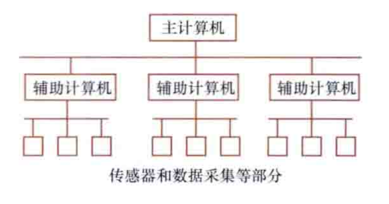


图4 分布式计算机监测诊断系统

参考书目

朱德恒，等著．电气设备状态监测与故障诊断技术．北京：中国电力出版社，2009.

jueyuanzi de zaixian zhenduan

绝缘子的在线诊断

（on-line insulation diagnosis of insulators） 对运行状态下的输电线路绝缘子进行试验和各种特性测量，分析其特征，并对绝缘状态作出判断的技术。推行和发展绝缘子在线诊断技术，能在早期发现故障，提高输电系统的运行可靠性。线路绝缘子在线诊断的项目有：①泄漏电流；②等值盐密；③表面电场分布；④红外测温；⑤紫外成像。

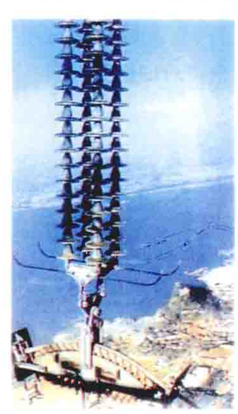


图1 超高压绝缘子链

泄漏电流 线路绝缘子（图1所示是绝缘子链，图2所示是1000kV架空输电线路）泄漏电流在线测量通常采用微电流传感器来检测流经绝缘子接地线泄漏电流信号，传感器的输出信号经放大、滤波、数据采集后经无线通信网络送计算机分析、储存，根据泄漏电流的大小判断绝缘子的老化程度。

等值盐密 绝缘子单位表面所沉积污秽物的等效NaCl质量。主要采用在运行绝缘子串相邻位置悬挂多片绝缘子的方式进行等值盐密的测量，能比较全面地反映整条线路污源分布情况和积污速度。也可采用石英玻璃作为光学传感器安装在绝缘子表面或相邻位置，沉积在光学传感器表面的污秽物粒子将对光信号产生吸收和散射，通过检测光信号参数的变化即可分析得到绝缘子表面的污秽水平。



图2 晋东南—南阳—荆门1000kV交流输电线路（吴石光 摄）

表面电场分布 利用电场测量探头沿着绝缘子串纵向逐点对绝缘子串表面电场进行检测，根据沿绝缘子串轴向表面电场分布情况判断是否存在缺陷绝缘子和零值绝缘子。正常绝缘子表面电场分布是均匀连续的，当出现零值或低阻绝缘子时电场分布会在缺陷部位发生突变。

红外测温 利用绝缘子因泄漏电流或绝缘缺陷而引起的局部过热现象来检测绝缘子的性能。正常的绝缘子在运行环境下发热很小，其温度分布决定于其电压分布；当绝缘子表面存在集中性破坏通道时，较大的泄漏电流会在绝缘子表面形成局部高温区域。红外测温仪可准确测量绝缘子表面的温度分布，以判断绝缘子的损伤程度。

紫外成像 线路绝缘子表面出现电晕、闪络或电弧时，会发射紫外线，空气中的氮气电离所产生紫外光谱主要集中在240～400nm波长范围内，处于太阳盲区。利用紫外成像仪接收放电产生的紫外线信号，经处理成像后与可见光图像叠加，即可确定放电发生的位置和强度，从而对劣化的绝缘子进行定位、定量的测量并评估其危害性。

图3所示为使用无人飞行器航巡特高压线路。

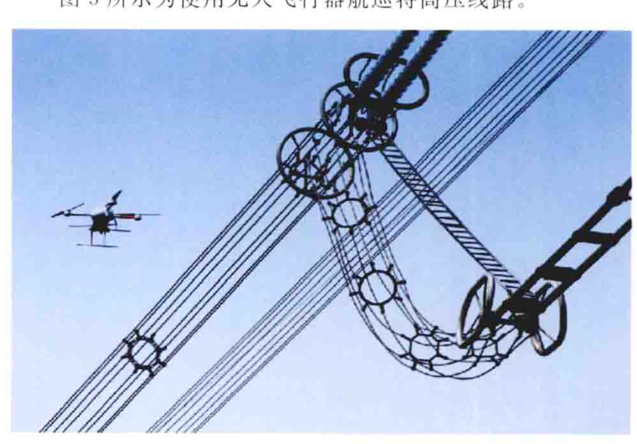


图3 无人飞行器航巡特高压线路

jueyuanzi wuhui fangdian shiyan

绝缘子污秽放电试验

（pollution discharge test of insulators） 测量污染绝缘子的放电特性，包括测量电压、

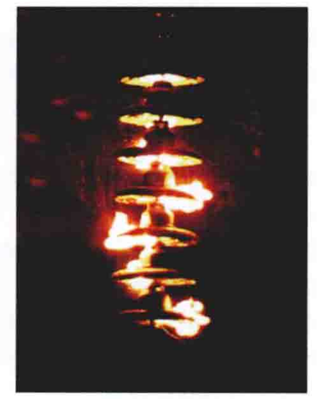
电流等的试验。试验目的是确定绝缘子的耐污性能。

绝缘子污秽放电试验，可分自然污秽试验和人工污秽试验。

自然污秽试验　在自然污秽环境中和正常运行电压下进行的绝缘子污秽试验。在所选的污秽环境中建立试验站，把各种绝缘子安装于站内带电运行，长期记录各种数据，如气候条件、绝缘子上积污情况、绝缘子的泄漏电流幅值大小和脉冲频数、绝缘子能耐受运行的时日等，从而比较绝缘子的耐污性能优劣。这种试验的优点是：运行条件和影响因素比较接近实际，可以考验绝缘子的自洁性能，便于筛选绝缘子。缺点是：需要建造较高运行电压的自然污秽试验站；需要较长时间才能得到结论；由于影响因素复杂多变，对结果很难进行分析。有时将运行中自然积污的绝缘子送到人工雾室测试污闪电压，可以加快试验过程。

人工污秽试验　在人工创造的污秽环境和条件下，用合适电源进行的绝缘子污秽试验。图示为试验室内摄得的工频污秽放电发展过程。人工污秽试验方法很多，使用较广的为固体污层法（硅藻土法）和盐雾法。前法是用硅藻土、二氧化硅、食盐和软化水制成混合液，按一定的盐密和灰密，涂刷到绝缘子表面，干燥后送入雾室试验。后法是将一定含盐量的 NaCl 溶液，用标准喷雾器喷出盐雾，使绝缘子在盐雾气氛中进行试验。对人工污秽试验的要求是等价性和重复性好，但由于影响因素复杂，不同人工污秽试验结果间的可比性较差。人工污秽试验的优点是：能在较短时间内取得结果，试验条件可控，结果便于分析；缺点是：试验条件与实际情况有差异，不能考验绝缘子的自洁性能。人工污秽试验筛选绝缘子的结果，常与自然污秽试验筛选的结果不同。


零散局部电弧


粗亮局部电弧


临闪前局部电弧


污秽闪络电弧

110kV 悬式绝缘子串工频污秽放电的发展过程（王建国　提供）





Kaerman lübo

卡尔曼滤波 (Kalman filtering) R. E. 卡尔曼提出的，从夹杂着噪声的信号中将所需要的信号分离出来的一种状态估计方法。

以前有一种状态估计方法称为维纳滤波，它在第二次世界大战期间得到了应用。其缺点在于：①必须使用全部的历史观测数据，存储量和计算量都很大；②当获得新的观测数据时，没有合适的递推算法；③很难用于非平稳过程的滤波问题。为克服上述缺点，在20世纪60年代初，美国数学家R. E. 卡尔曼（R. E. Kalman）等人发展了一种递推滤波方法，即现称的卡尔曼滤波。

利用量测数据集 $\boldsymbol{z}=\{z(\tau);\tau\leqslant t'\}$ 对状态 $\boldsymbol{x}(t)$ 进行估计，得到估计值 $\hat{\boldsymbol{x}}(t\mid t')$。根据 t 和 t' 的关系，估计问题可以分为如下三类：

（1）$t'=t$，称为滤波问题。

（2）$t'<t$，称为预测问题或外推问题。

（3）$t'>t$，称为平滑问题或内插问题。

如果不加区分，这三类问题可统称为滤波问题或估计问题。

下面只说明离散系统的滤波问题（$t=t'$情况）。

系统的状态方程和观测方程分别为

$$\boldsymbol{x}_k=\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\boldsymbol{x}_{k-1}+\boldsymbol{w}_{k-1},\boldsymbol{x}(t_0)=\boldsymbol{x}_0 \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{z}_k=\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{v}_k \qquad (2)$$

式中 $\boldsymbol{x}_k$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{z}_k$ 为 q 维观测向量；$\boldsymbol{w}_{k-1}$ 为 n 维输入（或动态、模型）噪声；$\boldsymbol{v}_k$ 为 q 维观测噪声；$\boldsymbol{w}_{k-1}$ 和 $\boldsymbol{v}_k$ 都是零均值的白噪声序列。$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$ 为 $n\times n$ 状态转移矩阵；$\boldsymbol{H}_k$ 为 $q\times n$ 观测矩阵。

可得卡尔曼递推滤波公式为

$$\begin{aligned}&\hat{\boldsymbol{x}}_k=\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}+\boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{z}_k-\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1})\\&\hat{\boldsymbol{x}}_0=\bar{\boldsymbol{x}}_0=\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x}_0)\end{aligned} \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{K}_k=\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}_k)^{-1} \qquad (4)$$

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{P}_{k|k-1}&\overset{\mathrm{def}}{=}\boldsymbol{E}\tilde{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}\tilde{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}^{\mathrm{T}}\\&=\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}_{k-1}\\\tilde{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}&\overset{\mathrm{def}}{=}\boldsymbol{x}_k-\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}=\boldsymbol{x}_k-\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

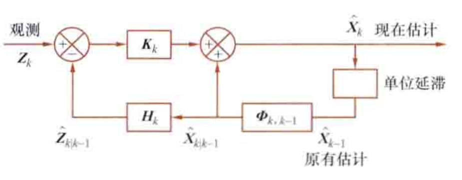
$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{P}_k&\overset{\mathrm{def}}{=}\boldsymbol{E}\tilde{\boldsymbol{x}}_k\boldsymbol{x}_k^{\mathrm{T}}\\&=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}_k)\boldsymbol{P}_{k|k-1}\\\boldsymbol{P}_0&=\mathrm{Var}\boldsymbol{x}_0,\tilde{\boldsymbol{x}}_k\overset{\mathrm{def}}{=}x_k-\hat{\boldsymbol{x}}_k\end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

$$\left.\begin{aligned}&\mathrm{E}\boldsymbol{w}_k=0,\mathrm{E}\boldsymbol{v}_k=0,\mathrm{Cov}(\boldsymbol{w}_k,\boldsymbol{v}_j)=\mathrm{E}\boldsymbol{w}_k\boldsymbol{v}_j^{\mathrm{T}}=0\\&\mathrm{Cov}(\boldsymbol{w}_k,\boldsymbol{w}_j)=\boldsymbol{E}\boldsymbol{w}_k\boldsymbol{w}_j^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{Q}_k\delta_{kj},\quad \delta_{kj}\begin{cases}1 & k=j\\0 & k\neq j\end{cases}\\&\mathrm{Cov}(\boldsymbol{v}_k,\boldsymbol{v}_j)=\boldsymbol{E}\boldsymbol{v}_k\boldsymbol{v}_j^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{R}_k\delta_{kj},\end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

式中 $\mathrm{Cov}(\boldsymbol{x}_0,\boldsymbol{w}_k)=\boldsymbol{E}\boldsymbol{x}_0\boldsymbol{w}_k^{\mathrm{T}}=0,\mathrm{Cov}(x_0,v_k)=\boldsymbol{E}x_0\boldsymbol{v}_k^{\mathrm{T}}=0$

这里，式（3）称为滤波方程，式（4）称为增益方程，式（5）称为预报误差（验前）方差方程，式（6）称为滤波误差（验后）方差方程，式（7）是输入噪声 $\boldsymbol{w}_k$ 和观测噪声 $\boldsymbol{v}_k$ 的统计特性。

卡尔曼滤波的实质是一步预测加校正，式（3）右端第一项是一步预测，第二项是校正，括号中的量是第 k 次观测中新的信息。滤波的工作原理如图所示。



离散系统卡尔曼滤波

kaifang xitong hulian

开放系统互连 (open system interconnection, OSI)

按照国际标准化组织ISO数据交换方面的标准和国际电信联盟ITU数据交换方面的建议，对开放系统的相互连接，可使不同厂牌的计算机、终端设备及人员、进程或网络之间的数据交换能毫无阻碍地相互沟通。“开放”一词只是作为对一种标准的信息交换规程的共同认识与支持，而不蕴涵有任何特别的系统实现技术及互连手段。

开放系统是指在实开放系统上，按OSI标准实现互连、互通和协作功能的有关部分，所有与互连无关的部分不属于OSI的范畴。

OSI范畴内，采用自上而下，逐步求精的分级体系结构。最高一级抽象是OSI参考模型，包括所有可能的服务、协议及其实现；其次一级抽象是OSI服务定义，包括所有可能的协议及其实现；最低一级的抽象是OSI协议规范说明，包括所有可能的实现。

分层原理　当几个开放系统互连在一起时，除最高和最低层外的任何一层，均可称为（N）层。这里的括号读作“第”。这是在标准文本中所采用的缩写。因此，（N）层表示“第N层”，而N层表示有“N”个层。在（N）层的上层和下层，分别为（N+1）层和（N−1）层。对每一个开放系统，则可按照7个层次分为7个划分，其中每个划分称作一个子系统。

有关术语　①实体。（N）实体是（N）子系统内的活动元素。同等实体是同一层内的实体。②服务。（N）服务是（N）层及其低层向（N+1）实体提供的一种能力（如排序、出错通知）。③功能。（N）功能是一个（N）实体活动的一部分（如流量控制、网络路由选择、数据传送）。④协议。（N）协议是一组规则和格式，它控制着在不同开放系统中执行（N）功能的（N）实体间的相互通信。⑤连接。为了在两个或多个同等（N+1）实体之间交换数据，必须先在（N）层中，用（N）协议在这些（N+1）实体间建立联系。然后才能利用（N）服务在（N+1）实体间交换数据。数据交换结束，可以释放连接。这种方式称“面向

连接方式”，这是参考模型定义的基本通信方式。与之相对的是“面向无连接方式”。

OSI七层模型　从低层到高层依次是物理层、数据链路层、网络层、运输层、会话层、表示层、应用层。①物理层。规定为其上一层（即数据链路层）提供一个物理连接，以便透明地传输比特流。②数据链路层。负责在两个相邻结点间的线路上，无差错地传送以帧为单位的数据。并负责建立、维持和释放数据链路的连接及流量控制。③网络层。在源数据电路终接设备（DCE）（见分组交换公用数据网）和目的DCE间可靠地传输数据分组。具有路由选择、寻址和流量控制等功能。④运输层。在端开放系统之间实现独立于通信子网的高效可靠报文交换，向高层提供不变的通用的接口。⑤会话层。建立、组织和管理协同工作的各高层两个互相通信的应用进程之间的交互和对话的同步。⑥表示层。将欲交换的数据从适合于某一用户的抽象语法（abstract syntax）变换为适合于OSI系统内部使用的传送语法（transfer syntax）。⑦应用层。为应用进程访问OSI环境提供服务，其中：联系控制服务元素，负责建立和释放应用实体之间的应用联系；远程操作服务元素，可以把一个用户所要进行的远程操作和携带的参数，传递给位于远地的另一个用户，并由远地的用户执行该操作，然后再利用该服务元素所提供的服务把操作结果发送给远程操作的调用者；特定应用服务元素是向用户提供各种特定的服务，如报文处理系统（message handle system，MHS）、文件传送存取和管理（file transfer access and management，FTAM）、虚拟终端协议（virtual terminal protocol，VTP）、作业传送和操纵、目录服务、远程数据库访问、事务处理、计算机图形、银行信息交换等。

kaiguan dianrong lüboqi

开关电容滤波器

开关电容滤波器　（switched capacitor filter）　对模拟连续信号直接进行数据采样和处理的有源滤波器。它不含A/D（见模数转换器）和D/A（见数模转换器）变换环节。开关电容滤波器虽然工作在离散域，但是，它仍然是有源模拟滤波器。它广泛用于音频的通信系统中，通常做成单片集成电路，简称SCF。

有源滤波器主要由电阻、电容和运算放大器组成。在MOS工艺中，制造电阻要比制造电容难得多，如果把其中的电阻用电容加开关来代替，则构成了新的器件即开关电容滤波器。用来代替电阻的电容和开关都用MOS工艺制造，分别叫MOS电容和MOS场效应晶体管开关（又称模拟开关）。

开关电容滤波器中的开关电容有接地开关电容和浮地开关电容两类。

接地开关电容　等效电阻的原理如图1所示。图1中模拟开关S用两个MOS开关来实现，电容用MOS电容C。开关S以频率f_C在U_1、U_2之间切换，f_C为采样信号的频率，采样周期为τ，即$f_C=1/\tau$。f_C也是MOS开关栅极控制信号的频率，两个MOS开关的栅极分别接互为反相的同频率f_C的控制信号φ_e和φ_0。当φ_e为高电位，φ_0为低电位时，开关S接到1，电容C上的电荷为$Q_1=CU_1$；当φ_e为低电位，φ_0为高电位时，开关S接到2，电容C上的电荷为$Q_2=CU_2$。因此，在周期τ期间，由U_1输送给U_2的电荷为$\Delta Q=Q_1-Q_2=C(U_1-U_2)$。这就相当于有一个电流$I$从$U_1$流向$U_2$，即$I=\Delta Q/\tau=C(U_1-U_2)/\tau$。设开关频率$f_C$比$U_1$和$U_2$的最高频率高得多，则图1所示的开关电容等效为在$U_1$和$U_2$之间有一个电阻$R$，其值为$R=(U_1-U_2)/I=\tau/C=1/f_C C$，如图1（c）所示。把此等效电阻接到普通的RC有源积分器以代替其中的电阻，就构成一个开关电容积分器，如图2所示。其传输函数为$H(s)=-\frac{1}{sRC_F}=-f_C\left(\frac{C}{C_F}\right)\frac{1}{s}$。可见，其传输函数取决于采样信号频率和电容比，而与电容的绝对值无关。

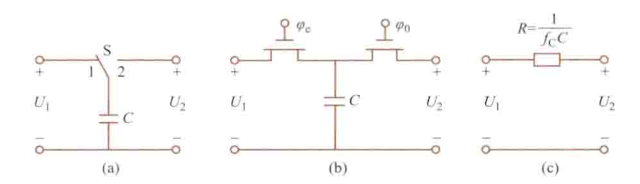


图1　接地开关电容等效电阻原理图

（a）、（b）简单的开关电容网络；（c）接地开关电容等效电阻

浮地开关电容　等效电阻的原理如图3所示。图3中当φ_0为高电平、φ_e为低电平时，开关S2闭合、开关S1断开，电容C清零；当φ_e为高电平、φ_0为低电平时，开关S2断开、开关S1闭合，电容C被充电到U_1-U_2，即在采样周期τ时期内，从U_1送到U_2的电荷为$\Delta Q=C(U_1-U_2)$，和接地开关电容相同。因此，其等效电阻也是$R=1/f_C C$。

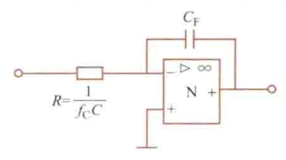
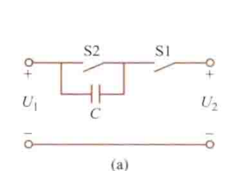


图2　开关电容积分器

由以上分析可知，只要满足采样频率f_C比U_1和U_2的最高频率高得很多，就可得到等效电阻$R=1/f_C C$。若把有源RC滤波器中的电阻逐一用接地开关电容或浮地开关电容的等效电阻代替，则可从有源RC滤波器推导出有源开关电容滤波器。



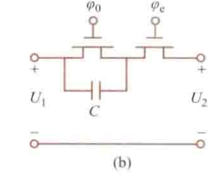


图3　浮地开关电容网络

kaiguan jueyuan de zaixian zhenduan

开关绝缘的在线诊断

开关绝缘的在线诊断　（on-line insulation diagnosis of switchgear）　对运行状态下的开关及GIS绝缘进行试验和各种特性测量，分析其特征，并对绝缘状态作出判断的技术。推行和发展开关绝缘在线诊断技术，能在早期发现故障，提高输电系统的运行可靠性。开关绝缘在线诊断的项目有：①局部放电；②SF_6气体分解物。

局部放电　由于开关及GIS运行安全设计要求采用多点接地方式，所以无法采用传统的脉冲电流法对其内部可能发生的局部放电缺陷进行测量。主要采用测量放电产生的特高频电磁辐射信号和超声波信号的方法来监测开关及GIS内部的局部放电，特高频检测采用的传感器为预置在开关内部或盆式绝缘子外部的天线，超声检测则采用压电晶体作为传感单元。传感器的输出信号经放大、滤波、数据采集后送

计算机分析、储存。要采取各种措施来抑制现场强烈的电磁干扰。可根据视在放电量或根据 φ-q-n（φ：放电发生时的工频电压相位；q：放电量；n：放电重复率）三维谱图用自动识别器进行判断。

气体分解物　SF_6 开关和 GIS 内部由于过热或放电缺陷产生的气体分解产物包括 SO_2、SOF_2、H_2S、CF_4、HF 和 CO 等，可通过安装在开关内部的气体传感器，检测分解物的气体组分和含量。可根据气体分解物的相对比例，判断开关内部绝缘缺陷的类型和严重程度。

kaiguanxing wenya dianlu

开关型稳压电路

（switching type voltage stabilizing circuits）　调整管（功率管）以开关方式工作的稳压电路。与线性稳压电路（见串联稳压电路）相比，它的功率转换效率可大于 90%，动态稳压性能好，可省去工频变压器，除体积、重量大大减小外，在电网电压大范围变化下仍能调节输出电压使其稳定。

发展过程　开关稳压电路是 20 世纪 60 年代发展起来的，控制电路主要采用脉冲宽度调制（pulse width modulation，PWM）和脉冲频率调制（pulse frequency modulation，PFM）两种方式，属硬开关技术。20 世纪 70 年代后相继开发出软开关技术。同时，由于大规模集成技术日趋完善，从而陆续开发出开关稳压电路专用的集成控制器、单片集成开关稳压电源模块。用它们组成的开关稳压电路成本低，性能优良可靠，使用方便，因而获得广泛的应用。

（1）脉冲频率调制：保持控制脉冲的宽度不变，改变脉冲频率以调节输出电压 U_o 使其稳定。当负载电流增大或电网电压降低，而使 U_o 下降时，通过控制电路使脉冲频率增加，就可以使 U_o 上升到原来稳定值，反之相同。

（2）脉冲宽度调制：控制脉冲的周期保持不变，改变脉冲占空比来调节输出电压 U_o 使其稳定。当负载电流增大或电网电压降低，而使 U_o 下降时，通过控制电路使脉冲宽度增加，就可以使 U_o 上升到原来稳定值，反之相同。由于这种方法控制脉冲的周期不变，滤波器电路容易设计，基本上都采用这种方法。

（3）硬开关技术：即强迫功率开关管在其电压不为零时开通，电流不为零时关断。在开关过程中，电压、电流变化有一个交叠过程，会产生开关损耗。开关频率越高，开关损耗就越大。提高开关频率，可使开关稳压电源的变压器、电感等的体积、质量大为减小，从而提高开关稳压电源的功率密度（单位体积输出功率），降低可闻噪声和改善动态响应。

（4）软开关技术：为了减小体积、质量和开关损耗，自 20 世纪 70 年代以来，不断研究开发高频软开关技术。“软开关”是指零电压开关（zero voltage switch，ZVS）或零电流开关（zero current switch，ZCS）。它是应用谐振原理，使开关稳压电路中功率开关管的电流（或电压）按正弦或准正弦规律变化，当电流过零时，使功率开关管关断，或电压为零时，使功率开关管开通，从而使开关损耗为零。

实现软开关有两种方法：①利用单端、半桥或全桥变换器中的寄生电感和寄生电容（如变压器漏感、功率开关管和整流管的结电容）或主电路负载中的电感和电容产生谐振，使功率开关管的电流或电压按准正弦规律变化，从而实现 ZCS 或 ZVS。谐振参数可以超过两个，此时就称为多谐振变换器（multi resonant converter，MRC）。用准谐振或多谐振技术的开关稳压电路，开关频率可达 1～10MHz，功率密度可达 4.9W/cm^3（硬开关的开关变换器受频率限制，功率密度最高为 0.03～0.18W/cm^3）。但软开关条件与电网电压、负载电流的变化有关，在轻载下有可能失去实现软开关的条件。②附加一个谐振网络辅助电路，以创造软开关条件，其中有谐振电感、电容和辅助功率开关管。

分类　开关稳压电路按输入电源和输出电源的类型可分为 AC-DC 型开关稳压电路和 DC-DC 型开关稳压电路。按激励方式可分为自励式和他励式。

（1）自励式稳压电路：出现最早，包括单管式和推挽式两种，一般用于小功率开关稳压电源。特点是电路简单、价低，但开关频率变化大，输出纹波大。

（2）他励式稳压电路：由一个方波发生器来推动功率开关电路。特点是可做到开关频率恒定，输出纹波较小。

kaihuan xitong

开环系统

（open loop system）　见控制系统。

kailu

开路

（open circuit）　支路中的电流恒为零、支路两端的电压可为任意值的一种特殊工作状态。断开的导线，处于断开状态的开关，反向工作的理想二极管以及电流为零的电流源等都处于开路状态。

在开路时支路两端的电压称为开路电压。开路电压可以用高内阻（理论上应为无限大）的电压表（晶体管电压表等）来测量。

kangcixing

抗磁性

（diamagnetism）　在有外加磁场的情况下，物质获得一个对抗该外加磁场的磁矩的现象。放在外磁场中的物质，若其磁化强度 M 方向与外加磁场强度 H 方向相反，则称这种物质具有抗磁性。抗磁性是一种微弱的磁性。通常把具有抗磁性的磁体称为抗磁质。由磁化率 χ_m 的定义 $M=\chi_m H$ 可知，抗磁质的磁化率 χ_m 为负的，且一般与磁场强度和温度无关，数量级为 10^{-5}～10^{-6}。

从微观角度看，物质磁性主要决定于原子中电子的运动，电子绕核作轨道运动，具有轨道磁矩，电子本身还具有自旋运动，相应地具有自旋磁矩。原子磁矩是原子中各电子轨道磁矩与自旋磁矩的矢量和。一个分子的磁矩，则是分子中各原子磁矩的矢量和。抗磁质的分子磁矩为零。

用电磁感应定律可以证明，任何物质放在外磁场中时，组成该物质的每个分子内都将感生一方向总是与外磁场方向相反的附加磁矩，这种现象称为抗磁性效应。由于抗磁质的分子磁矩为零，因此在外磁场中，抗磁质的磁化强度方向与磁场强度方向相反，这就是抗磁性产生的微观解释。

从原子结构看，具有满电子壳层的原子、离子或分子等组成的物质为抗磁性的，如惰性气体、Li^+、F^-、食盐、水及多种有机化合物等。实际上，自然界中绝大多数物质都

是抗磁性的。

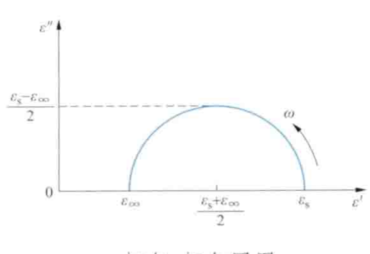
应当指出，具有顺磁性、铁磁性的物质在磁场作用下也要产生抗磁性效应，只不过它们的顺磁性、铁磁性效应比抗磁性效应强，因此抗磁性效应被掩盖。

超导体是理想的抗磁体。

Keer-Keer yuantu

柯尔-柯尔圆图 (Cole-Cole diagram) 描述电介质复电容率实部 ε' 和虚部 ε'' 间关系的一种图形表示法。它是 K. S. 柯尔 (K. S. Cole) 和 R. H. 柯尔 (R. H. Cole) 于 1941 年提出的。在电介质中极化机制具有单一松弛时间时，其复电容率的实部和虚部随频率的变化在 $(\varepsilon', \varepsilon'')$ 组成的平面坐标系中为一个半圆，圆心在横轴上 $\varepsilon'=(\varepsilon_\infty+\varepsilon_s)/2$ 处，圆的半径为 $(\varepsilon_s-\varepsilon_\infty)/2$，如图所示。这个圆的方程为

$$\left(\varepsilon'-\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{2}\right)^2+\varepsilon''^2=\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{2}\right)^2$$



柯尔-柯尔圆图

圆周的顶点对应 ε'' 的最大值。当电介质的极化机制具有多种松弛时间时，ε' 与 ε'' 在坐标系中的图形将不是一个圆心在横轴上的半圆，所以柯尔-柯尔圆图也是研究电介质极化与损耗机理的一种工具。

kexue jisuan

科学计算 (scientific computation) 为解决物理、力学、化学、空间等学科的一些主要问题，研究相关的数学模型和计算方法，使其能在计算机上进行运算的数值计算。数学模型通常为代数方程组、微分方程和积分方程。对于微分方程或积分方程，需先将其离散化，把它们转化为代数方程组，研究求解的计算方法，而后编制程序在计算机上进行计算。如果计算结果不符合要求，还需分析和修改数学模型及计算方法重复上述过程。

科学计算与理论、实验并列为科学研究的三种方法，在许多领域，已有用科学计算部分地代替实验的倾向。科学计算已发展成为包括计算数学、计算物理学、计算力学、计算化学和计算经济学等各种计算工程学的一门交叉性学科。近年来发展起来的稀疏矩阵技术、有限元素法、样条函数、多重网络和自适应网络、蒙特卡罗法和随机选择等计算方法已被广泛用于解决科学和工程中的各种问题。

科学计算软件是为解决科学和工程问题而研制的计算机软件，多用 FORTRAN 语言编制，可分为通用数学软件和应用软件两类。①解决科学和工程中的数学问题的通用数学软件，如求解线性代数方程组、常微分方程等，常组织成程序库作为软件产品供用户使用。②面向特定工程计算的应用软件，如计算机辅助飞机设计软件、油田开发、电网调度软件等。

计算机的科学计算能力仍然有限，许多基础学科和工程技术部门已提出超过现有计算能力的大型科学计算问题。这些问题的解决，有赖于研究出更高效的计算方法和大大提高计算机的速度。

kexue jisuan keshihua

科学计算可视化 (visualization in scientific computing, VISC) 综合运用计算机图形学、数字图像处理、计算机视觉、计算机辅助设计和人机交互技术等相关领域的技术，将科学计算数据、工程计算数据或测量数据转换为图形/图像显示出来，并进行交互处理的理论、方法和技术。它的主要功能是从复杂的多维数据中产生图形，也可以分析和理解存入计算机中的图像数据，为高效地处理数据和解释数据提供了有力的工具。

1987 年 2 月，B. H. McCormick 等根据美国国家科学基金会召开的“科学计算可视化研讨会”的内容撰写的一份报告中将图形和图像技术应用于科学计算，正式提出了“科学计算可视化”的概念。科学计算可视化的应用领域十分宽广，几乎包括了自然科学、工程计算和空间信息中的一切领域。科学计算可视化已经广泛应用于计算流体力学、有限元分析、医学图像处理、分子结构模型、天体物理、空间探测、地球科学和数学等领域。

发展阶段 计算机用于科学计算和数据处理已有近 60 年的历史。从功能实现的角度看，科学计算可视化技术的发展经历了后处理、实时跟踪处理和显示、驾驭处理三个阶段。

(1) 后处理阶段。由于受计算机技术水平的限制，只能以脱机处理或批处理的方式处理数据，然后用图像显示出来；而不能对计算过程进行干预和引导，只能被动地等待计算结果的输出。

(2) 实时跟踪处理和显示阶段。由于计算机的计算速度迅速提高，内存容量和磁盘空间不断扩大，网络功能日益增强，并可用硬件来实现图形生成及图像处理算法，因此可运用数据可视化技术，直观、形象地用三维动画显示海量的数据和信息，并进行实时的交互处理。

(3) 驾驭处理阶段。随着网络和计算机功能的进一步提高，科学计算可视化的结果可以自动反馈到计算过程。例如，可以根据计算结果交互式地修改原始数据、边界条件或其他参数等，以求更精确的结果。

主要特点 包括交互性、多维性和可视性。

(1) 交互性。用户可以方便地以交互的方式管理和开发数据。

(2) 多维性。可以看到表示对象和事件的数据的多个属性或变量，而数据可以按每一维的值，进行分类、排序、组合和显示。

(3) 可视性。数据可以用图像、曲线或动画显示出来，并可对其模式和相互关系进行可视化分析。

研究内容 ①标量场、向量场和张量场的显示；②数据场和流场的动态显示；③多参量数据场的显示；④数值模拟和计算过程的交互控制和引导；⑤面向图形的程序设计环境；⑥工作站和超级计算机的联网使用；⑦传输图像的高带宽网络及其协议；⑧用于图形生成和图像处理的并行算法；⑨用于图形生成和图像处理的特殊硬件结构；⑩虚拟现实技术在科学计算可视化中的应用等。科学计算结果所形成的数

据场往往是三维空间数据场，即数据值均一一定义于空间的某个几何位置，而工程计算数据及测量数据的可视化也具有这一性质。因此，三维空间数据场的可视化是科学计算可视化的核心研究内容，它与近年来提出的信息可视化（information visualization）有重要区别。

信息可视化　如果说科学计算可视化着重于空间数据的可视化，那么信息可视化侧重于非空间数据的可视化。对于非空间信息（如金融数据、商业信息、文档集合、抽象概念等），它们并没有明显的空间特征，同样也需要用可视化形式来观察。尤其是近年来网络技术和电子商务的发展，进一步提出了信息可视化的要求。所谓信息可视化就是利用计算机支撑的、交互的、对抽象数据的可视化表示来增强人们对这些非空间抽象信息的认知。信息可视化技术将为人们发现规律、辅助决策、解释现象提供强有力的支持。人们可以借助可视化技术，发现大量金融、通信和商业数据中隐含的规律，从而为决策提供依据。

kebiancheng luoji kongzhiqi

可编程逻辑控制器

（programmable logic controller，PLC）　一种专为在工业环境下应用而设计的，具有微处理器和存储器等功能部件，可以按现场控制要求编制程序的、数字运算操作的电子控制装置。PLC能够存储和执行命令，进行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作，并通过数字式的或模拟式的输入输出来控制各种类型的机械设备或生产过程。

发展历程　PLC是从继电器控制系统发展而来的。1969年美国的数字设备公司（DEC）研制成功了世界上第一台可编程控制器，主要有逻辑运算、定时和计算功能。1980年之后，由于计算机技术的发展，PLC采用通用微处理器为核心，功能扩展到各种算术运算。经过40多年的发展，PLC硬件已实现高速度、大容量、小体积和模块化。PLC已具有温度控制、阀门控制、冗余控制、远程通信以及智能行为，它已不限于顺序控制，开始应用于闭环过程控制和复杂分布式计算机控制系统。

特点　编程简单、维护方便、可靠性高、通用性强、可在恶劣工业环境下长期稳定工作。因此，PLC已广泛应用在各种机械设备或生产过程的自动控制系统中。

硬件组成　由基本组成部分（中央处理器CPU、存储器和输入/输出系统）和可选部件构成。在PLC运行过程中，由基本组成部分完成预定的各种控制任务。可选部件主要用于系统的编程组态、程序存储、通信联网、系统扩展、系统测试和维护。PLC软件通常采用梯形图、功能块以及语句表等编程语言。

kebiancheng luoji qijian

可编程逻辑器件

（programmable logic devices，PLD）　一种用编程技术实现某种逻辑功能的半导体集成电路。基本结构如图1所示。器件内部包含输入电路、与阵列、或阵列和输出电路。PLD的特点是各输入与输出之间的关系并非固定不变，它可以按照用户的要求，通过编程的方法进行定义。在设计数字电子系统时使用PLD，可以获得较大的灵活性和较短的开发周期。

分类　可依据编程特性、编程方法和集成密度的不同进行分类。①按内部阵列编程特性分为：可编程只读存储器（PROM、EPROM）、可编程逻辑阵列（PLA）、可编程阵列逻辑（PAL）和通用阵列逻辑（GAL）；②按编程方法分为：基于SRAM的编程、熔丝编程（包括PN结击穿法编程）和基于浮栅型编程元件的可擦除编程（包括电擦除编程）；③按集成密度分为：低密度PLD和高密度PLD。目前广泛使用的是高密度PLD，这类器件集成度一般可达数千门甚至上万门，具有在系统编程或现场编程特征。高密度PLD主要有基于乘积项技术的复杂可编程逻辑器件（CPLD）、可擦除可编程逻辑器件（EPLD），以及基于SRAM结构的现场可编程门阵列（FPGA）。

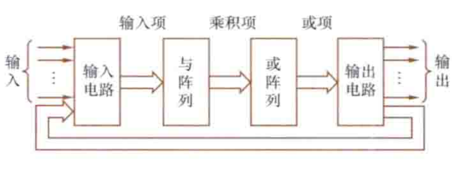


图1　PLD基本结构方框图

连接关系和逻辑图画法　在可编程逻辑器件中，阵列的输入线与输出线之间的连接关系如图2所示，分为三种情况：①硬线连接，如图2（a）所示，表示横竖两线固定连接，用户不可编程；②可编程连接，如图2（b）所示，表示用户可以用编程方法实现交叉点上的横竖两线的连接；③编程断开，如图2（c）所示，表示编程后的横竖两线断开。

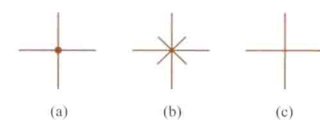


图2　PLD连接表示法
（a）硬线连接；（b）可编程连接；（c）编程断开

由于PLD规模很大，描述PLD结构逻辑关系的符号与传统逻辑门的符号不同，在PLD中使用了简化画法，如图3所示。

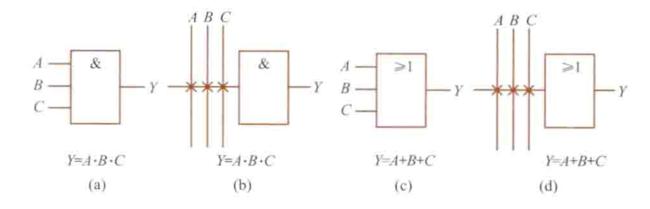


图3　传统逻辑门符号与对应PLD的简化画法
（a）、（c）传统逻辑门符号；（b）、（d）PLD简化画法

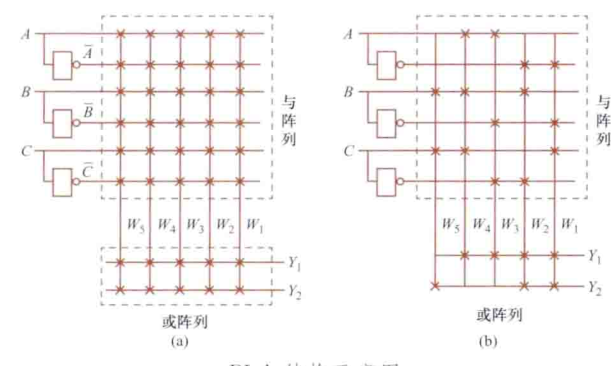
用途及优势　可编程逻辑器件是电子设计领域中最具活力和发展前途的一项技术。它能完成任何数字器件的功能，上至高性能CPU，下至中小规模的74系列电路。PLD如同一张白纸或是一堆积木，设计者可以通过传统的原理图输入法、硬件描述语言等自由地设计数字系统。与使用中小规模器件设计数字电路的传统方式相比，使用PLD开发数字系统，可通过软件仿真验证设计的正确性；利用PLD在系统编程功能可随时更新和升级系统；可以大大缩短设计时间，减少系统体积，提高系统的可靠性。可编程逻辑器件的优点使其在20世纪90年代以后得到飞速的发展，同时也大大推动了电子设计自动化（electronic design automation，EDA）和硬件描述语言的进步。

kebiancheng luoji zhenlie

可编程逻辑阵列 (programmable logic array, PLA)

包含可编程的“与”逻辑阵列及“或”逻辑阵列的可编程逻辑器件。它适宜于实现经过简化后的与或式逻辑函数功能。PLA只允许用户进行一次编程。

PLA的结构示意图如图(a)所示，其中A、B、C是输入逻辑变量，Y_1、Y_2是逻辑函数输出。“与”阵列可以根据要求产生各个与项$W_1 \sim W_5$，“或”阵列再从中取若干个进行组合(逻辑相加)，便可得所需逻辑函数输出。



PLA结构示意图

(a) 编程前；(b) 编程后

若希望实现的逻辑函数为

$$Y_1 = \overline{A}\,\overline{B}C + \overline{A}B\,\overline{C} + A\,\overline{B}\,\overline{C} + ABC$$

$$Y_2 = \overline{A}\,\overline{B}C + \overline{A}B\,\overline{C} + BC$$

即有三个输入变量、两个输出函数，包含五个与项，选择图中规格的器件较合适。五个“与”项为：$W_1 = \overline{A}\,\overline{B}C$，$W_2 = \overline{A}B\,\overline{C}$，$W_3 = A\,\overline{B}\,\overline{C}$，$W_4 = ABC$，$W_5 = BC$。

对“与”阵列编程，将输出线W_1对应输入与$\overline{A}$、$\overline{B}$、C三根信号线交叉点处接通，即得W_1与项，类似方法得到其他与项。对“或”阵列编程，使Y_1对应输入与W_1、W_2、W_3、W_4线接通即得输出函数Y_1。编程后得图(b)所示的示意图。

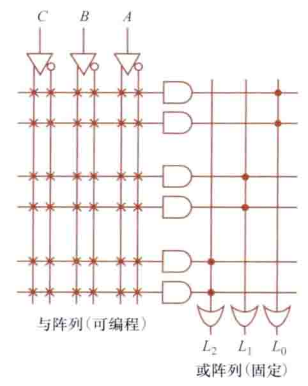
许多工厂都生产了PLA系列化产品，产品规格以(输入变量数)×(“与”阵列输出端数)×(“或”阵列输出端数)表示。图中所示的规格为3×5×2的PLA。

PLA编程困难，高质量的支撑软件和编程工具较少。因此，没有能像通用阵列逻辑(GAL)那样得到广泛的应用。

kebiancheng zhenlie luoji

可编程阵列逻辑 (programmable array logic, PAL)

一种包含可编程的“与”逻辑阵列和固定连接的“或”逻辑阵列的可编程逻辑器件。它主要用于产生一组多输出的逻辑函数，每个输出是若干个积项之和，而其中积项的数目是固定的。其内部原理示意图如图所示，PAL是一次性熔丝编程结构。



PAL基本结构示意图

分类　按其输出结构可分为三种基本类型：①I/O输出结构，即输出端引脚既可作输出用，又可作输入用；②专用输出结构，即输出端引脚只能作为输出用；③寄存器输出结构(时序输出结构)，即内部含有触发器，可以用来实现同步时序逻辑电路。

特点　只能一次编程；PAL实现的每个逻辑函数都是独立的，但每个逻辑函数乘积项的数量不能超过器件中每个输出所具有的乘积项的数量；集成密度较低，输出不能重组，若要求不同的输出结构，则需选用不同型号的PAL器件。

kecachu kebiancheng luoji qijian

可擦除可编程逻辑器件 (erasable programmable logic devices, EPLD)　一种采用CMOS和UVEPROM工艺制作，可以进行多次编程的高密度可编程逻辑器件。编程有紫外线擦除和电擦除两种方法。

EPLD的基本结构与GAL(见通用阵列逻辑)并无本质区别，但EPLD增加了输出逻辑宏单元(OLMC)的数量，并使OLMC的使用更加灵活，其集成密度比GAL高得多，可以实现较为复杂的逻辑电路。EPLD的主要缺点是内部互连性较差，复杂可编程逻辑器件(CPLD)是EPLD的改进器件，增加了内部连线，并改进了逻辑宏单元和I/O单元。

keguancexing

可观测性 (observability)　可在有限时间内，由输出即观测值识别出控制系统全部状态变量的属性。可观测性讨论的是状态和输出之间的关系。事实上，如果初始时刻系统的状态已被识别，在给定了控制作用后，系统各瞬时的状态就唯一地确定了。因此，对系统在有限时间内状态的识别，可以归结为对系统初始时刻状态的识别。

线性连续系统的可观测性　对于线性时变控制系统

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x} + \boldsymbol{D}(t)\boldsymbol{u}\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

式中$\boldsymbol{x}$为n维状态向量；$\boldsymbol{u}$为p维输入向量；$\boldsymbol{y}$为q维输出向量。对初始时刻t_0，若存在另一时刻$t_\alpha > t_0$，根据在$[t_0, t_\alpha]$的输出$\boldsymbol{y}(t)$和已知的输入$\boldsymbol{u}(t)$，可以唯一地确定系统在t_0时刻的初始状态，则称系统在$[t_0, t_\alpha]$上是状态完全可观测的。

系统可观测性的主要性质：①如果系统在$[t_0, t_\alpha]$上状态完全可观测，那么对于$t_\beta > t_\alpha$，系统在$[t_0, t_\beta]$上也必状态完全可观测。②如果存在$[t_0, t_\alpha]$上绝对可积函数$f(t)$的扰动，可观测性不受影响。③如果$\boldsymbol{x}_0$是$[t_0, t_\alpha]$上可观测的，a为任意非零实数，则$a\boldsymbol{x}_0$也是在$[t_0, t_\alpha]$上可观测的。④如果$\boldsymbol{x}_{01}$和$\boldsymbol{x}_{02}$都是$[t_0, t_\alpha]$上可观测的，则$\boldsymbol{x}_{01} + \boldsymbol{x}_{02}$也必是$[t_0, t_\alpha]$上可观测的。⑤代数等价的线性系统具有相同的可观测性。

控制系统的可观测性完全取决于状态空间表达式中矩阵$\boldsymbol{A}(t)$和$\boldsymbol{C}(t)$的形态。因此，可根据这两个矩阵所构成的一些数学表达式的性质判别系统的可观测性，即所谓可观测性判据。如果线性连续时变系统在定义区间$[t_0, t_\alpha]$上满足解的存在和唯一性条件，则其在$[t_0, t_\alpha]$上状态完全可观测的充要条件是矩阵$\boldsymbol{M}_0(t_0, t_\alpha) \overset{\text{def}}{=\!=} \int_{t_0}^{t_\alpha} \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(t, t_0)\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{C}(t)$

$\times\boldsymbol{\Phi}(t,t_0)\mathrm{d}t$ 非奇异，其中 $\boldsymbol{\Phi}(\cdot,\cdot)$ 为状态转移矩阵，上角标 T 为矩阵转置符。

对于线性定常控制系统

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}$ 为 p 维输入向量；$\boldsymbol{y}$ 为 q 维输出向量。

状态完全可观测的充要条件是矩阵 $\boldsymbol{Q}_0\overset{\text{def}}{=\!=\!=}[\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\vdots\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\vdots\cdots\vdots(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})^{n-1}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}]$满秩。

线性离散系统的可观测性　对于线性离散时变控制系统

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}(kT+T)&=\boldsymbol{G}(kT)\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{H}(kT)\boldsymbol{u}(kT)\\ \boldsymbol{y}(kT)&=\boldsymbol{C}(kT)\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{D}(kT)\boldsymbol{u}(kT)\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}$ 为 p 维输入向量；$\boldsymbol{y}$ 为 q 维输出向量。

在区间 $[hT,lT]$ 上状态完全可观测的充要条件是矩阵

$$\boldsymbol{M}_0(hT,lT)\overset{\text{def}}{=}\sum_{k=h}^{l-1}\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}[(k+1)T,hT]\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(kT)[(k+1)T,hT]$$

非奇异，式中 $\boldsymbol{\Phi}$ 为状态转移矩阵。对于线性离散定常系统

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}(kT+T)&=\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{H}\boldsymbol{u}(kT)\\ \boldsymbol{y}(kT)&=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(kT)\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}$ 为 p 维输入向量；$\boldsymbol{y}$ 为 q 维输出向量。状态完全可观测的充要条件是矩阵 $\boldsymbol{Q}_0\overset{\text{def}}{=}[\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\vdots\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\vdots\cdots\vdots(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}})^{n-1}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}]$满秩。

kekongxing

可控性

(controllability)　控制系统的状态可由控制向量控制的属性。可控性讨论的是状态和控制作用之间的关系，它研究给定任意两个不同的状态通过幅值不受限制的控制作用，可否在有限的时间内把系统由一个状态转移到另一个状态。

线性连续系统的可控性　对于线性时变控制系统

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}(t)\boldsymbol{u}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

对初始时刻 t_0，存在另一时刻 $t_\alpha>t_0$，对于 t_0时刻的任意初值 $\boldsymbol{x}(t_0)=\boldsymbol{x}_0$，如果可以找到容许控制 $\boldsymbol{u}$，使 $\boldsymbol{x}(t_\alpha)=\boldsymbol{x}_\alpha$，则称系统在 $[t_0,t_\alpha]$ 上是状态完全可控的。式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}$ 为 p 维输入向量；$\boldsymbol{y}$ 为 q 维输出向量。

控制系统可控性的主要性质：①如果系统在 $[t_0,t_\alpha]$ 上状态完全可控，那么对 $t_\beta>t_\alpha$，系统在 $[t_0,t_\beta]$ 上也必状态完全可控。②如果存在不依赖于控制作用 $\boldsymbol{u}$ 的扰动 $f(t)$，只要 $f(t)$ 是绝对可积函数，系统的可控性不受影响。③如果 $\boldsymbol{x}_0$ 是 $[t_0,t_\alpha]$ 上的可控状态，a 为任意非零实数，则 $a\boldsymbol{x}_0$也是 $[t_0,t_\alpha]$ 上的可控状态。④如果 $\boldsymbol{x}_{01}$ 和 $\boldsymbol{x}_{02}$ 都是 $[t_0,t_\alpha]$ 上的可控状态，则 $\boldsymbol{x}_{01}+\boldsymbol{x}_{02}$ 也必是 $[t_0,t_\alpha]$ 上的可控状态。⑤代数等价的线性系统具有相同的可控性。

控制系统的可控性完全取决于状态空间表达式中矩阵 $\boldsymbol{A}(t)$和 $\boldsymbol{B}(t)$ 的形态。因此可根据由这两个矩阵所构成的一些数学表达式的性质判别系统的可控性，即所谓可控性判据。如果线性连续时变系统在定义区间 $[t_0,t_\alpha]$ 上满足解的存在和唯一性条件，则其在 $[t_0,t_\alpha]$ 上状态完全可控的充要条件是矩阵 $\boldsymbol{W}_c(t_0,t_\alpha)\overset{\text{def}}{=}\int_{t_0}^{t_\alpha}\boldsymbol{\Phi}(t_0,t)\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}(t_0,t)\mathrm{d}t$ 为非奇异，式中 $\boldsymbol{\Phi}$ 为状态转移矩阵，上角标 T 为矩阵转置符。

对于线性定常控制系统

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

系统状态完全可控的充分必要条件是矩阵 $\boldsymbol{Q}_c\overset{\text{def}}{=}[\boldsymbol{B}\vdots\boldsymbol{AB}\vdots\cdots\vdots\boldsymbol{A}^{n-1}\boldsymbol{B}]$满秩。式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量，$\boldsymbol{u}$ 为 p 维输入向量；$\boldsymbol{y}$ 为 q 维输出向量。

线性离散系统的可控性　对于线性离散时变控制系统

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}(kT+T)&=\boldsymbol{G}(kT)\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{H}(kT)\boldsymbol{u}(kT)\\ \boldsymbol{y}(kT)&=\boldsymbol{C}(kT)\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{D}(kT)\boldsymbol{u}(kT)\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

在区间 $[hT,lT]$ 上状态完全可控的充要条件是矩阵

$$\boldsymbol{W}_c(hT,lT)\overset{\text{def}}{=}\sum_{k=h}^{l-1}\boldsymbol{\Phi}[hT,(k+1)T]\boldsymbol{H}(kT)\times\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(kT)\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}[hT,(k+1)T]$$

为非奇异。式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}$ 为 p 维输入向量；$\boldsymbol{y}$ 为 q 维输出向量。

对于线性离散定常控制系统

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}(kT+T)&=\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{H}\boldsymbol{u}(kT)\\ \boldsymbol{y}(kT)&=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(kT)\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

系统状态完全可控的充分必要条件是矩阵 $\boldsymbol{Q}_c\overset{\text{def}}{=}[\boldsymbol{H}\vdots\boldsymbol{GH}\vdots\cdots\vdots\boldsymbol{G}^{n-1}\boldsymbol{H}]$满秩。式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}$ 为 p 维输入向量；$\boldsymbol{y}$ 为 q 维输出向量。

kekuozhan biaoji yuyan

可扩展标记语言

(extensible markup language, XML)　与 HTML 一样，都是标准通用标记语言（standard generalized markup language, SGML）。XML 是互联网环境中跨平台的、依赖于内容的技术，是当前处理结构化文档信息的有力工具，是一种能定义其他语言的网页设计语言。XML 是一种简单的数据存储语言，使用一系列简单的标记描述数据，而这些标记可以用方便的方式建立，其最初的设计目标是弥补 HTML 的不足，以强大的扩展性满足网络信息发布的需要，后来逐渐用于网络数据的转换和描述。

XML 没有复杂的语法和包罗万象的数据定义，主要具有先进性、灵活性、自描述性和简明性四个特点。①先进性：XML 允许使用者创建和使用他们自己的标记而不是 HTML 的有限词汇表，作为应用领域信息共享与数据交换的基础；②灵活性：XML 提供了一种结构化的数据表示方式，使得用户界面分离于结构化数据；③自描述性：XML 文档通常包含一个文档类型声明，不仅人能读懂 XML 文档，计算机也能处理；④简明性：XML 只有 SGML 约 20% 的复杂性，但却具有约 80% 的 SGML 功能，比完整的 SGML 简单得多，易学、易用并且易实现。

XML 支持世界上几乎所有的主要程序语言，并且不同语言的文本可以在同一文档中混合使用，应用 XML 的软件能处理这些语言的任何组合。所有这一切将使 XML 成为数

据表示的一个开放标准，这种数据表示独立于机器平台、供应商以及编程语言。从1998年开始，XML就被引入许多网络协议，以便为不同软件提供相互通信的标准方法。

Kelasuofusiji fangfa

克拉索夫斯基方法 （Krasovskii method） 以俄国学者克拉索夫斯基命名的一种构造李雅普诺夫函数，判定非线性控制系统稳定性的方法。

考虑非线性系统 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$，$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{0})=\boldsymbol{0}$，设 $\boldsymbol{f}$ 具有连续一阶偏导数。这里，$\boldsymbol{x}$ 是 n 维状态向量，$\boldsymbol{f}$ 也是 n 维向量。令 $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x})$ 为 $\boldsymbol{f}$ 的雅可比矩阵

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x})=\frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}=\begin{bmatrix}\partial f_1/\partial x_1 & \partial f_1/\partial x_2 & \cdots & \partial f_1/\partial x_n\\ \partial f_2/\partial x_1 & \partial f_2/\partial x_2 & \cdots & \partial f_2/\partial x_n\\ \cdots & \cdots & & \cdots\\ \partial f_n/\partial x_1 & \partial f_n/\partial x_2 & \cdots & \partial f_n/\partial x_n\end{bmatrix}$$

若存在一正定对称常数矩阵 $\boldsymbol{P}$，使得 $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{P}+\boldsymbol{PJ}(\boldsymbol{x})$ 对于所有 $\boldsymbol{x}$ 为负定，则非线性系统是在原点渐近稳定的，此时李雅普诺夫函数为 $V(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Pf}$。

例如，要判定下述系统的稳定性

$$\dot{x}_1=-3x_1+x_2;\dot{x}_2=x_1-x_2-x_2^3$$

则应用克拉索夫斯基方法，取 $\boldsymbol{P}=\boldsymbol{I}$，得

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x})=\begin{bmatrix}-3 & 1\\ 1 & -1-3x_2^2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-3 & 1\\ 1 & -1-3x_2^2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-6 & 2\\ 2 & -2-6x_2^2\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x})$ 是负定的。又有 $V(\boldsymbol{x})$ 是正定的，所以原点是渐近稳定的。此外，当 $\|\boldsymbol{x}\|\to\infty$ 时，$V(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Pf}\to\infty$，于是，平衡状态 $\boldsymbol{x}=0$ 是在大范围内渐近稳定的。

kongjian dianhe shiyan

空间电荷试验 （space charge measurement） 对电介质中空间电荷的大小、分布及其变化进行测量。空间电荷是指在固体、液体、气体电介质中以及不同电介质界面某区域内存在的净电荷。空间电荷容易在聚合物绝缘体、绝缘油、干燥绝缘气体等电阻率很高的绝缘材料及不同电介质界面中存在。

聚合物绝缘体中的空间电荷源自陷阱效应，电荷在陷阱中的停留时间取决于陷阱深度。固体聚合物的形态结构是近程有序、远程无序。在无序区域，如晶区与非晶区的界面、支链、端基、链折叠，弯曲、断链、残余应力和杂质等，都能形成电荷陷阱，这些陷阱俘获从电极注入的电子或空穴或在外加电场的作用下产生迁移的载流子而形成空间电荷。液体绝缘油流动过程中，因流速不同使层间及与固体绝缘材料界面发生接触分离，在油中形成正的或负的空间电荷。气体绝缘中，因放电所致气体分子电离也会产生空间电荷。空间电荷的产生是一个随机过程，受温度、外电场、加压时间、试样几何形状、电极类型及其材料、电极-试样界面特性、试样的制备工艺、化学构成、结晶度、氧化度、杂质等多种因素的综合影响。电介质中空间电荷的存在，会产生电场畸变，局部电场集中，使电介质的绝缘性能降低。

固体电介质中空间电荷的测试方法主要有电-声脉冲法和压力波法（见固体电介质内空间电荷测量）。液体电介质中空间电荷的测试方法主要有克尔（Kerr）效应测量法和油流动带电测试法。

kongqi

空气 （air） 构成地球周围大气的气体。空气无色、无味，主要成分是氮和氧，还有极少量的氦、氩、氖、氪、氙等惰性元素和水蒸气、二氧化碳、微生物、杂质等。空气是使用最广泛的气体绝缘电介质。架空输电线的相间绝缘和相对地绝缘以及敞开式户外变电站中高压设备间的绝缘都是以空气作为绝缘介质的。常以电气强度表征其绝缘性能的优劣。

影响空气电气强度的因素很多，主要有电场均匀度、空气的密度与湿度、电压的波形与极性等。在标准大气条件（气压0.1MPa，温度293K）下，1cm的均匀电场空气间隙的击穿电压约为30kV（峰值），但间隙距离增大时击穿电压并不成正比地增加。空气密度低于标准大气条件时，击穿电压下降，所以对用于高海拔地区的电气设备，要加大绝缘距离。电场不对称时，空气的击穿具有极性效应。对极不均匀电场，当曲率半径较小的电极上施加正极性电压时，击穿电压比施加负极性电压时要低（但负极性电晕起始电压比正极性时略低）。湿度对极不均匀场空气间隙的击穿也有影响。绝对湿度增大时击穿电压略有提高。对于极不均匀场间隙，雷电冲击波作用下的击穿电压高于稳态击穿电压；但对于长间隙，正操作冲击击穿电压常低于稳态击穿电压。因此对于超高压和特高压电气设备，要进行操作冲击耐压试验，而不能用1min工频耐压试验代替。

在给定的空间内通过抽真空使空气分子的密度远低于该地区大气压的空气分子密度，当真空度低于 $10^{-2}\sim10^{-4}$ Pa 时，稀薄的空气可作为真空绝缘。理论上真空是一种理想的绝缘体，但在一定电压下也会发生放电。真空主要用于断路器、X射线管和粒子加速器等电气电子设备中。

kongqi jianxi jichuan dianya

空气间隙击穿电压 （breakdown voltage of air gaps） 以空气作为电介质的电极之间的间隙发生击穿时的电压。由于气体放电理论还不完善，空气间隙的击穿电压无法精确计算，实际上大多是通过试验来确定或用经验公式近似地估算（见图1）。空气间隙的击穿电压与电场分布、间隙距离、电压种类及空气状态等有关。

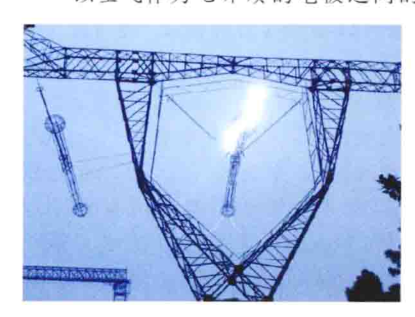


图1 中国武汉交流特高压试验基地交流线路空气间隙放电试验

击穿电压的概率分布 空气间隙的击穿电压 U 是随机变量，其分布规律可用正态概率分布函数描述，即

$$F(U)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{U}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U-U_{50}}{\sigma}\right)^2\right]\mathrm{d}U$$

式中 U_{50} 为50%击穿电压（直流及工频电压下有时称为平均击穿电压）；σ 为击穿电压的标准差。

极性效应　对于非对称分布的电场，在直流、操作冲击或雷电冲击电压下，当最大场强所在电极为正极性（电极的电位比其他电极的电位高时为正极性）时空气间隙的击穿电压与该电极为负极性时的不同。这种效应称为极性效应。

均匀电场中的击穿电压　对均匀电场，只有间隙距离不太大时的试验数据。试验结果表明：各种电压（直流、工频、操作冲击、雷电冲击电压）下的50%击穿电压实际上都相同，击穿电压的分散性较小。计算 U_{50}（峰值）的经验公式为 $U_{50}=24.22\delta d+6.08\sqrt{\delta d}$，kV。式中 d 为间隙距离，cm，$0.01\text{cm}\leqslant d\leqslant 10\text{cm}$；$\delta$ 为空气相对密度。由此公式可知，当 $\delta=1$、$d>1\text{cm}$ 时，海平面处均匀电场中空气的电气强度大约为30kV/cm。

稍不均匀电场中的击穿电压　在稍不均匀电场中，直到击穿为止不发生电晕时，各种电压下的50%击穿电压实际上都相同，击穿电压的分散性也不大。当电场分布不对称时，具有不明显的极性效应，负极性时空气间隙的击穿电压稍低于正极性时击穿电压。稍不均匀电场中，空气间隙的击穿电压与电场的不均匀程度有关，电场分布越是趋于均匀，同样间隙距离时的击穿电压就越高，其极限就是均匀电场中的击穿电压。可近似认为：稍不均匀电场中的最大场强达到30kV/cm时，间隙将击穿。此时，击穿电压的估算公式为 $U_{50}=30d/f$，kV。式中 d 为间隙距离，cm；f 为电场不均匀系数，是最大场强与平均场强之比。

极不均匀电场中的击穿电压　与均匀及稍不均匀电场不同，在极不均匀电场中，各种电压下空气间隙击穿电压的差别比较明显，分散性也较大。当电场分布不对称时，极性效应显著，正极性时空气间隙的击穿电压低于负极性击穿电压。通常选择棒-板电极和棒-棒电极作为典型电极，分别代表了不对称分布和对称分布极不均匀电场的极端情况。在没有合适的试验数据可供使用时，可参照棒-板或棒-棒间隙的试验数据来近似估计极不均匀电场空气间隙的击穿电压。间隙距离相同时，棒电极为正极性的棒-板间隙的击穿电压比棒为负极性时低得多，而棒-棒间隙的击穿电压介于两者之间。

(1) 直流电压下的击穿电压：试验表明，在间隙距离小于3m时，击穿电压与间隙距离呈线性关系。对棒-板电极，棒为正极性时，平均击穿场强为4.5kV/cm；棒为负极性时约为10kV/cm。对棒-棒电极，平均击穿场强为4.8～5.0kV/cm。

(2) 工频电压下的击穿电压：棒-板电极间施加工频电压时，击穿总是在棒的极性为正、电压达到峰值时发生。图2所示为空气间隙的工频击穿电压 U_{50} 与间隙距离 d 的关系。随着 d 的增加，U_{50} 的增加逐渐趋于缓慢，即具有饱和现象。击穿电压的标准差 σ 约为 U_{50} 的3%。

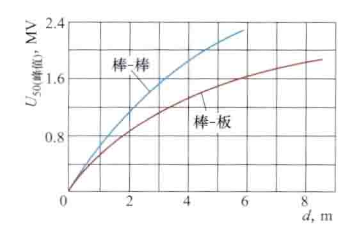


图2　空气间隙的工频击穿电压

(3) 操作冲击电压下的击穿电压：图3所示为空气间隙在操作冲击电压下的击穿电压 U_{50} 与 d 的关系，U_{50} 与 d 之间有明显的饱和现象。操作冲击电压的波前时间 T_{cr} 对击穿电压也有影响，随 T_{cr} 的增加，U_{50} 先是下降，然后上升，曲线呈U形，U_{50} 有极小值。d 越大，使 U_{50} 出现极小值的 T_{cr} 也越大。击穿电压的标准差 σ 约为 U_{50} 的5%～8%。

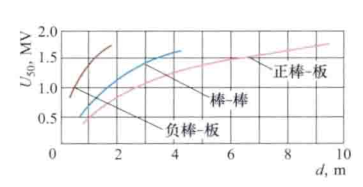


图3　空气间隙的操作冲击(500/50 000μs)击穿电压

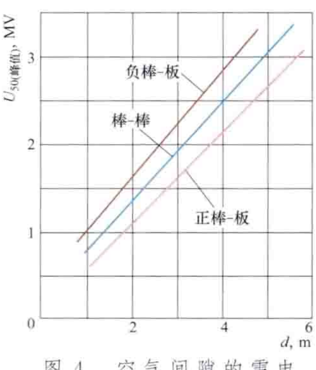


图4　空气间隙的雷电冲击击穿电压

(4) 雷电冲击电压下的击穿电压：图4所示为空气间隙在雷电冲击电压下的击穿电压 U_{50} 与 d 的关系。U_{50} 与 d 呈线性关系。击穿电压的标准差 σ 约为 U_{50} 的3%。

kongzhiqi

控制器　(control unit)　计算机内根据指令码有序地发出微操作控制信号的部件。

计算机硬件系统执行一条指令所经历的阶段有：①取指令。根据指令计数器形成的指令地址从主存储器读取指令并存入指令寄存器，指令计数器递增，形成后继指令地址。②解释指令。对取得的指令进行译码，确定操作类型和操作数地址形成方式。③执行指令。根据指令操作码的规定对操作数作相应的操作，并将结果存入指定的部件。在上述各阶段中，控制器根据处理器状态信息，在一定的时刻向运算器、存储器等有关部件发出一系列微操作控制信号（运算器的“加”或“减”，存储器的“读”或“写”，寄存器的“清零”“置数”“移位”等），以实现指令功能。

基本结构　控制器通常包含下列部件（见图1）：①指令计数器（又称程序计数器）：存放指令的地址；②指令寄存器：存放当前执行的指令码；③译码电路：解释指令操作类型及操作数寻址方式；④定时信号形成电路：产生处理器所需的定时信号；⑤状态寄存器：存放处理器当前状态信息（上次运算结果是否为零，是否发生溢出等）；⑥地址形成电路：根据寻址方式形成操作数地址或后继指令地址；⑦控制信号形成电路：根据指令操作码、处理器状态和定时信号产生一组微操作控制信号，分别送到运算器、存储器、寄存器等部件。

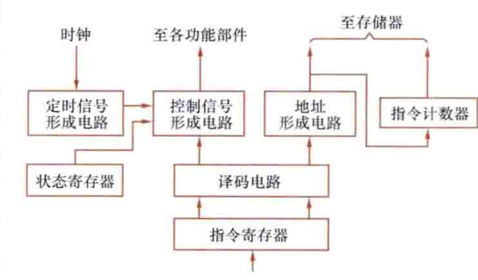


图1　控制器基本结构

同步控制和异步控制　为使控制器能严格按照规定的顺序发出控制信号，必须提供定时信号。相对于控制信号的产生，控制方式有同步控制和异步控制两种。①同步控制。定时信号（又称节拍信号）周期固定，执行每条指令所需的节拍数统一按最复杂指令需要的节拍数确定。同步控制的逻辑简单，但对多数指令存在多余的节拍，因此，指令的执行速度较慢。②异步控制。没有周期固定的节拍信号，每个操作终结时有反馈信号送给控制器，使其发出下一个或下一批控制信号，作为下一个操作的启动信号，这种应答方式要传递和控制大量反馈信息，控制逻辑比较复杂，每条指令没有多余的节拍，指令的执行速度较快。

在实际应用中，常常采取折中方式。把每条指令的执行过程分成几个基本周期（又称机器周期），每个基本周期的节拍数固定，但每条指令经历的基本周期数不固定，根据指令功能而定。

硬连逻辑控制器和微程序控制器　根据微操作控制信号形成方式的不同，分硬连逻辑控制器和微程序控制器两种。①硬连逻辑控制器。每个控制信号都是指令操作码、处理器状态、定时信号的逻辑函数，经优化后形成最简逻辑式，用组合逻辑电路实现。硬连逻辑内部结构不规整，指令功能的扩充、维护、调试、修改困难，但速度快，为高性能计算机及精简指令集计算机所采用。②微程序控制器。使用一个高速存储器作为控制存储器，它的每一个字对应为一条微指令，包括微操作控制段和微地址段两部分，前者规定需执行的微操作控制信号，后者规定下一条微指令地址。每条微指令执行一个或几个微操作。机器指令的微操作顺序由微指令排序决定。每条机器指令对应一段微程序，该微程序在控制存储器中的位置与机器指令操作码存在确定的对应关系。微程序控制器中每个微操作控制信号的形成时间是统一的，决定于控制存储器的读出周期。

串行控制和流水线控制　计算机运行一个程序是逐条执行机器指令的过程。控制方法有两种：串行控制和流水线控制。①串行控制。只有当前指令执行完后才取下一条指令，指令与指令之间在执行时间上是串行的。②流水线控制。把整个指令的执行过程分解成一系列比较简单的、可独立执行的步（如图2），并将多条指令或多个操作的步骤，按流水方式重叠执行的一种工作方式，使相邻指令依次在各段分解，有效地提高了指令执行的速度。由于指令相关性和条件转移指令的存在，实现流水线控制的硬件逻辑比串行控制复杂得多。过去曾是大型机和巨型机所采用的结构，随着超大规模集成电路技术的发展，微处理机已普遍采用。

T_0	T_1	T_2	T_3
取0号指令	解释0号指令	执行0号指令	
	取1号指令	解释1号指令	执行1号指令
		取2号指令	解释2号指令
			取3号指令

图 2　流水线控制示意图

kongzhi xitong

控制系统　(control system)　由被控对象和控制装置（控制器）构成的，能够对被控对象的工作状态进行控制的总体。例如，由同步发电机和励磁控制装置构成的，能够控制同步发电机的励磁、调节电压的同步发电机励磁控制系统。代替或部分代替人的直接参与，采用自动装置实现控制的控制系统，是自动控制系统。许多控制系统是物理系统，但不限于是物理系统。系统是一个很广泛的概念，可以是物理的，也可以是生物的，乃至经济的、社会的。例如，人体就是一个极其复杂的反馈控制系统。

以下一些技术内容与控制系统密切相关。

输入量　（输入变量、输入信号、参考输入、激励）作用于一个元件、装置或系统输入端的量，对于物理系统，它是物理量，可以是电量，也可以是非电量。一般是时间的函数。

输出量　（输出变量、输出信号、被控输出、响应）被控元件、装置或系统输出端的量，对于物理系统，它是物理量，可以是电量，也可以是非电量。它是系统初始状态和输入量的函数。

被控制量　被控对象被要求控制的量。对于物理系统，它是物理量。通常，它是控制系统输出量之中的一个（或一部分），是被控对象工作状态的重要变量。

控制量　控制装置的输出量，它通过执行机构改变输入于被控对象的物料、能量或信号，从而对被控对象进行控制。

干扰（扰动）　引起被控制量变化的除控制量而外的所有变量，以及影响各元、部件输出量变化的因素。干扰产生在系统内部称为内扰，干扰产生在系统外部则称为外扰。

反馈　将输出信号送回到输入端，以增强或减弱输入信号的效应。使输入信号增强者称为正反馈；使输入信号减弱者称为负反馈。反馈信号与输出量成比例者称为硬反馈或刚性反馈；反馈信号与输出量关于时间的导数成比例者称为软反馈或柔性反馈。

反馈控制　在自动控制系统中，将被控对象的输出量经反馈通路送回到输入端，与给定的参考输入比较，形成偏差信号。偏差信号通过控制元件的作用控制输出量，使输出量与参考输入的偏差保持在容许范围以内。

反馈控制系统　实行反馈控制的系统。

自动调节系统　能使被调对象的被调量维持在规定值或按一定规律变化的反馈控制系统。如：压力自动调节系统、电压自动调节系统，等等。

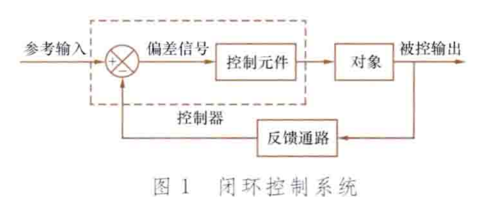


图 1　闭环控制系统

闭环控制系统　系统输出信号对控制作用能有直接影响的系统，也就是反馈控制系统，如图 1 所示。

开环控制系统　系统的输出量对系统的控制作用没有影响的系统。开环控制系统不是反馈控制系统，如图 2 所示。

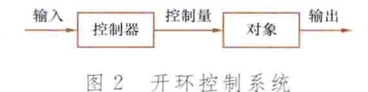


图 2　开环控制系统

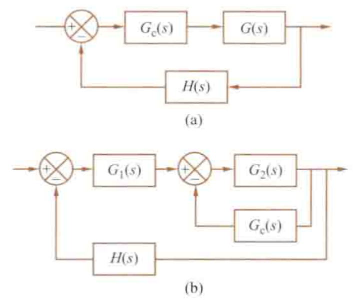
kongzhi xitong sheji yu buchang

控制系统设计与补偿　(design and compensation of control system)　自动控制系统设计过程中，对系统调

整有关参数或加入辅助装置，使系统满足所要求的性能指标的技术措施。控制系统的性能指标可以用时域的特征量（上升时间、最大超调量和调整时间等）给出，也可以用频域的特征量（相位裕量、增益裕量或谐振峰值和带宽等）给出。此时，可相应采用根轨迹法或频率响应法进行系统设计。这种设计方法是一种试探法，通常只适用于单输入单输出线性定常控制系统的设计。

用试探法设计控制系统时，首先考虑一种方案，检查它是否满足全部性能指标要求。如果不能满足则需修改方案或对系统进行调整，直至找到满意的方案，或者在给定的指标无法满足或所设计的系统造价很高时，也可以修改性能指标。系统中被控对象的动态特性常常是固定不能改变的，为了使系统满足性能指标而对系统进行调整时，只能调整被控对象以外的参数，首先是调整增益值。但在大多数实际情况中，仅仅调整增益并不能使系统达到所要求的性能指标，因而要对系统引入附加装置，即补偿装置。引入补偿装置的目的在于用附加的零点和极点对系统实行补偿，从而改变系统的根轨迹或频率特性曲线，使系统的性能指标满足要求。在有些文献中，这类问题称为系统的综合。

一般，有串联补偿和反馈补偿。串联补偿如图（a）所示，补偿装置［传递函数为 $G_c(s)$］与前向通路传递函数 $G(s)$ 串联连接。反馈补偿如图（b）所示，它从某处引出反馈信号，构成内反馈回路，在内反馈回路中设置补偿装置 $G_c(s)$。反馈补偿也称为并联补偿。



控制系统的串联补偿和反馈补偿

（a）串联补偿；（b）反馈补偿

广泛采用的串联补偿装置，有超前补偿、滞后补偿和滞后-超前补偿，它们可以是电气的、机械的、气动的、液压的，或者是它们的混合形式。通常多采用电气补偿装置，因为其简单、精度和可靠性高、容易调整。

控制系统的设计除了补偿以外，还包括许多实际问题，包括方案和元部件的选择、可靠性、经济性、安装和调整等问题。

kongzhi xitong wendingxing

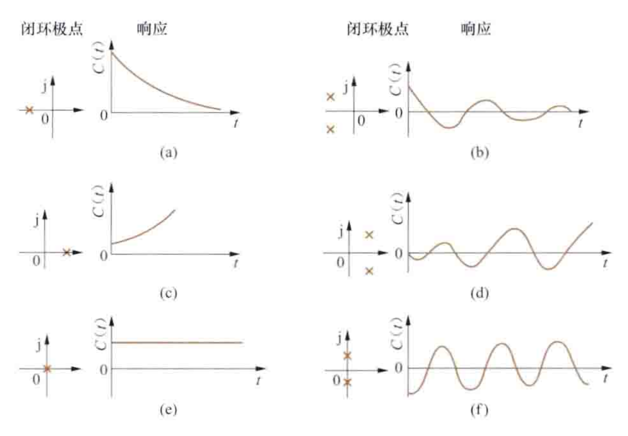
控制系统稳定性 （control system stability） 控制系统受到扰动后，其运动能保持在有界的区域内或回到原平衡状态的性能。

如果任何有界的输入使线性定常控制系统产生有界的输出，则称系统是稳定的。所谓输入（输出）有界，是指在任何时刻输入（输出）的大小都小于某一有限值。

稳定的线性定常系统，在一定的输入信号作用下有确定的输出，在输入信号改变时输出能够达到另外的确定状态。受到扰动量的作用后，输出量最终能返回到平衡状态。

如果线性定常控制系统受到扰动量作用后，输出量无限制地偏离其平衡状态，则系统是不稳定的。实际上，物理系统的输出量只能增加到一定的量值，此后或者受到限制，或者使系统遭到破坏，也可能当输出量超过一定数值后，系统变成非线性的，那时线性系统的表述就不再适用。

线性闭环控制系统的稳定性，决定于复数 s 平面上闭环极点的位置，图示为闭环极点的六种不同情况。



系统的闭环极点及响应

（a）负实数，响应按指数规律衰减，稳定。

（b）一对实部为负的共轭复数，响应为衰减振荡，稳定。

（c）正实数，响应按指数规律增长，不稳定。

（d）一对实部为正的共轭复数，响应为增幅振荡，不稳定。

（e）零，响应为一恒定值。

（f）一对符号相反的纯虚数，响应为等幅振荡。

系统的闭环极点只要有一个或一对位于右半 s 平面内，则随着时间的增加，动态响应是单调上升过程，或者是振幅逐渐增大的振荡过程，系统是不稳定的。如果有闭环极点在复平面的原点或 $j\omega$ 轴上，则响应为恒定值或等幅振荡，实际上也是不能工作的。

线性定常控制系统稳定的充分必要条件：它的全部闭环极点（亦即微分方程的特征方程的全部根）都是负实数或实部为负的复数，亦即全部闭环极点都位于复数平面的左半平面。

线性系统是否稳定，是系统本身的一种属性，与系统的输入量无关。

根据稳定的充分必要条件来判定线性定常控制系统的稳定性，需要求解闭环系统特征方程式。对于高阶系统来说，求解是相当困难的，因而，开发了多种不需求解特征方程就能判定线性定常控制系统是否稳定的间接方法。应用得多的有劳斯-赫尔维茨稳定判据和奈奎斯特稳定判据。

使用伯德图或尼科尔斯图也可以判断控制系统稳定性，见相对稳定性。

kongzhi xitong xingneng yaoqiu

控制系统性能要求 （performance requirements of control system） 实现控制系统稳定、快速、准确运行的要求。

影响系统运行状况有如下几个因素：对于一个闭环控制系统，在保证系统稳定运行的前提下，当输入量和扰动量均不变时，系统输出量也恒定不变，这种状态称为平衡状态或

静态、稳态，此时系统输出量与期望值间的偏差称为静态误差；但当输入量或扰动量发生变化时，反馈量将与输入量之间产生新的偏差，通过控制器的作用，使输出量最终稳定，即达到一个新的平衡，这一过渡过程称为动态过程或暂态过程，其形式一般可分为单调过程、衰减振荡过程、等幅振荡过程。

稳定性　稳定性是对控制系统最基本的要求。所谓系统稳定，一般指当系统受到扰动作用后，系统的被控制量偏离了原来的平衡状态，但当扰动撤离后，经过若干时间，系统若仍能返回到原来的平衡状态，则称系统是稳定的。

准确性　系统稳态精度通常用它的稳态误差来表示。如果在参考输入信号作用下，当系统达到稳态后，其稳态输出与参考输入所要求的期望输出之差叫做给定稳态误差。显然，这种误差越小，表示系统输出跟踪输入的精度越高。

快速性　控制系统不仅要稳定和具有较高的精度，而且还要求系统的响应具有一定的快速性。控制系统从一个平衡点到达一个新平衡点所需的过渡时间的长短，决定了系统的快速性。系统响应速度定量的性能指标，一般可以用上升时间、调整时间和峰值时间等指标来表示。

由于被控对象运行目标不同，各类系统对上述三方面性能要求的侧重点是有差异的。同时，系统动态响应的快速性、高精度与系统稳定性之间存在着矛盾，在系统设计时须针对具体的系统要求，均衡考虑各指标。

kongzhi zuoyong

控制作用

（control action）　自动控制器使被控对象的输出实际值与要求值之间的误差降至零或微小值的控制信号的作用。

图 1 为控制系统框图。自动控制器由误差检测器和控制作用发生器组成。传递函数为 $H(s)$ 的反馈通路将输出量 $C(s)$ 变换成适宜于与参考输入信号 $R(s)$ 比较的量，经比较后形成作用误差 $E(s)$，然后经控制作用发生器形成控制作用 $M(s)$，去作用于被控对象。图中还示出了干扰（扰动）变量 $N(s)$，它经由传递函数为 $G_3(s)$ 的环节进入系统。

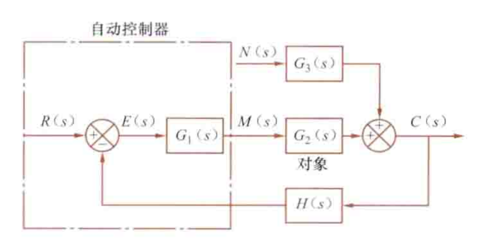


图 1　控制系统框图

控制作用可分为如下几种类型：两位控制、比例控制、积分控制、比例-积分控制、比例-微分控制、比例-积分-微分控制等。

两位控制　也称为双位控制或继电器型控制，其输出只有简单的两个固定位置，例如水银触点式温度计借助其通或断可以构成温度两位控制等。

比例控制　按比例规律动作的控制，可简称 P 控制。其输出 $m(t)$ 与误差信号 $e(t)$ 之间的关系为

$$m(t)=K_p e(t)$$

式中 K_p 为比例系数或增益，亦即放大倍数。比例控制器的传递函数为

$$G_1(s)=M(s)/E(s)=K_p$$

其框图如图 2 所示。比例控制器实质上是具有可调增益的放大器，它能减小偏差，但不能完全消除偏差。

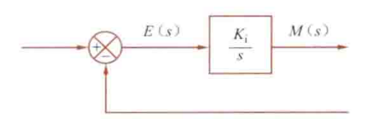


图 2　比例控制器框图

积分控制　简称为 I 控制，积分控制器的关系式为

$$m(t)=K_i\int_0^t e(t)\mathrm{d}t$$

式中 K_i 是一个可调的参数。积分控制器的传递函数为

$$G_1(s)=M(s)/E(s)=K_i/s$$

其框图如图 3 所示。

图 3　积分控制器框图

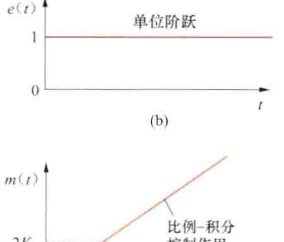
比例-积分控制　简称 PI 控制，其控制作用为

$$m(t)=K_p e(t)+\frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t$$

传递函数为

$$G_1(s)=M(s)/E(s)=K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}\right)$$

式中 K_p 为比例系数或增益，T_i 为积分时间常数，二者都是可调的。由于有比例和积分控制作用，因而能最终消除偏差。只要有偏差存在，控制器就要使执行机构动作，直到完全消除偏差为止，见图 4。



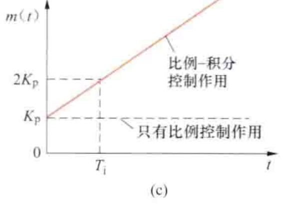


图 4　比例-积分控制器

（a）框图；（b）输入；（c）输出

比例-微分控制　简称 PD 控制（图 5），其控制作用为

$$m(t)=K_p e(t)+K_p T_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}$$

传递函数为

$$G_1(s)=M(s)/E(s)=K_p(1+T_d s)$$

式中 K_p 为比例系数或增益，T_d 为微分时间常数，二者都是可调的。微分控制作用在误差信号尚未变得太大之前就产生一个有效的修正，有助于提高系统的性能。微分控制作用只是在暂态过程中才是有效的，它不单独使用。

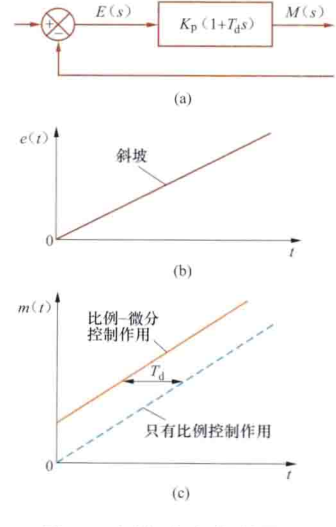


图 5　比例-微分控制器

（a）框图；（b）输入；（c）输出

比例-积分-微分控制　简称 PID 控制，其控制作用为

$$m(t)=K_p e(t)+K_p T_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}+\frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t$$

传递函数为

$$G_1(s)=M(s)/E(s)=K_p\left(1+T_d s+\frac{1}{T_i s}\right)$$

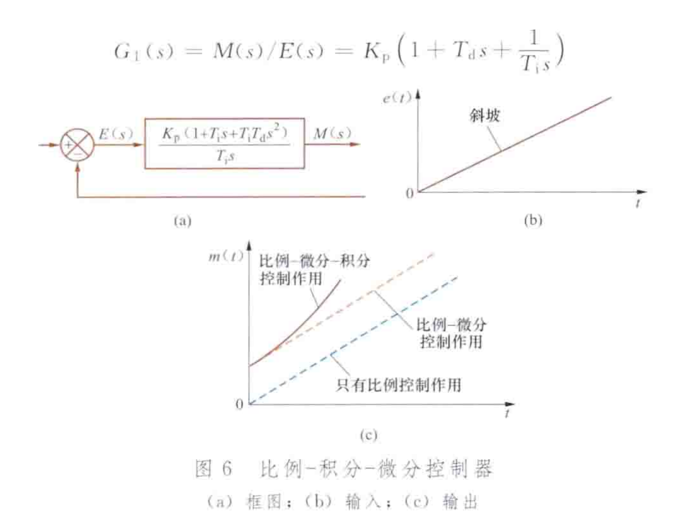


图 6 比例-积分-微分控制器

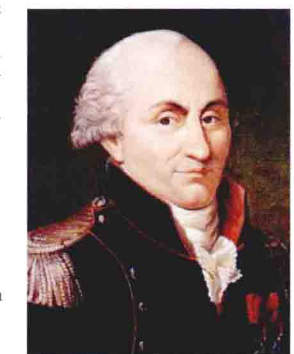
(a) 框图；(b) 输入；(c) 输出

式中 K_p、T_d 和 T_i 的意义与前述相同，三者都是可调的。

这种控制如能适当组合，可以兼有三种控制作用的优点。

kulun

库仑 （coulomb） 国际单位制（SI）中电荷、电通量等量的单位。库仑简称库，符号是 C。导线中流过 1A 恒定电流时，1s 内穿过导线任何截面的电荷量定义为 1C。图为库仑的画像，电荷的单位是以他的名字命名的。



库仑（Charles Augustin de Coulomb，1736—1806）

Kulun dinglü

库仑定律 （Coulomb's law） 描述两个静止点电荷之间电场力定量关系的基本定律。1785 年由法国物理学家 C.-A. 库仑（C.-A. de Coulomb，1736—1806）通过实验总结所提出。库仑定律的内容是：在无限大真空中，两个静止的点电荷 q_1 和 q_2 之间的静电力 $\boldsymbol{F}$，其大小与两个电荷所带电荷量的乘积成正比，与电荷间的距离 r 的平方成反比，作用力的方向沿两点电荷的连线方向，同性电荷相斥，异性电荷相吸。用 $\boldsymbol{r}^{\circ}$ 表示 $\boldsymbol{r}$ 方向的单位矢量，库仑定律的数学表达式为

$$\boldsymbol{F}=\frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\boldsymbol{r}^{\circ}$$

式中力的单位是牛［顿］(N)；电荷的单位是库［仑］(C)；ε_0 是真空电容率，其值约为 8.85×10^{-12} F/m。点电荷位于空气中时，其相互作用的静电力和在真空中的静电力相差极小，故在工程上库仑定律对放置于空气中的点电荷亦成立。空气的电容率近似等于 ε_0。这里所说的点电荷，实际上是指电荷分布在一个很小的区域内，当其线度远较电荷之间的距离小时，把电荷近似地看作为集中在一个可不计体积的物理无限小的点上。库仑定律明确地给出：静电力对距离 r 的依赖关系是平方反比律。虽然原始实验的准确度只有百分之几，但经过现代更精密的实验证实，静电力按 $1/r^{2+\alpha}$ 变化，α 的极限值约为 10^{-16}，从而揭示了平方反比律的正确性。根据库仑定律，经过数学运算和物理推理，可以导出高斯通量定理和麦克斯韦方程组中的有关方程。因而库仑定律是宏观电磁场理论的一个重要的实验基础。

kuandai zonghe yewu shuziwang

宽带综合业务数字网 （broadband integrated services digital network，B-ISDN） 一种能提供宽带传输信道并能适应从低速到高速的各类业务在同一网中进行传送和交换的网络。在只能提供基群速率以内电信业务的窄带综合服务数字网（narrowband integrated services digital network，N-ISDN）基础上发展起来的，采用异步转移模式（asynchronous transfer mode，ATM）的数字通信网络。

B-ISDN 具有以下特点：①在宽带用户—网络接口（user-network interface，UNI）上至少能提供 H4（135Mbit/s）接口速率，并允许在最高速率之内选择任意速率；②能提供各种连接形态；③信息传送的时延及畸变足够小；④不仅能支持传送图像、话音等固定比特率型的业务，还能有效地支持分组通信等可变比特率型的业务；⑤采用光缆及宽带电缆。

国际电信联盟远程通信标准化组织（ITU-T）针对 B-ISDN 的特点和功能，采用开放系统互连 OSI（open system interconnection，OSI）中的分层原则制定的协议参考模型是一个三维立体模型。其中，上面的三个平面分别为：①用户平面，具有分层结构，用来传送用户信息和有关控制信息；②控制平面，也有分层结构，处理为建立呼叫和控制连接所需的共路信令；③管理平面，提供层管理和平面管理两种不同的功能。从下至上的三个层次分别为：①物理层，负责在物理媒体上正确传输和接收比特流，并实现信元流和比特流的转换，以及传输帧的产生和恢复等；②ATM 层，主要完成交换和复用功能；③ATM 适配层（也称为 AAL 层），用于增强 ATM 层所提供的服务，因而向上面高层提供 B-ISDN 所需服务。

B-ISDN 的典型业务如表所示。

B-ISDN 的典型业务发展表

业务类型		业务实例
交互型业务	会话业务	宽带可视电话和宽带可视会议
	消息业务	话音、视频信函
	检索业务	宽带可视图文、视频点播
分配型业务	用户可单独演示控制	视频图文广播、远程教学和培训
	用户不能单独演示控制	电视广播、电子出版、电子报刊等

kuangwu jueyuanyou

矿物绝缘油 （mineral insulating oil） 从石油中提炼精制而成的绝缘油，简称矿物油。石油的主要成分是烷烃、环烷烃和芳香烃，它们是制造绝缘油的主要成分。石油的组成成分随产地而异，环烷烃含量小于 30% 的原油常称为石蜡基原油，大于 35% 的原油常称为环烷基原油。一般用环烷基原油为原料提炼的绝缘油抗老化性较好。取轻质润滑油中不同的馏分油，控制精制深度，调整黏度、闪点、凝

固点等，可以得到变压器油、电缆油、电容器油、开关油等不同用途的绝缘油。矿物油为非极性液体电介质，相对电容率ε_r约为2.2，标准电极（中国国家标准GB/T 507规定，球电极直径25mm，两球电极间距离2.5mm）中击穿电压不小于30kV，体积电阻率为$10^{10}\sim10^{11}\ \Omega\cdot m$，介质损耗因数小于0.001。矿物油的闪点为125～135℃，凝固点为－10～－55℃。变压器油的凝固点规定不高于－25℃或－45℃（25号或45号油）。为降低凝固点，可加入适当的降凝剂。为除去油中有害杂质，提高介电性能，应予以精制（见液体绝缘材料）。但矿物油过度精制会过多地除去油中所含天然抗氧剂和芳香烃成分，降低稳定性与吸气性，故矿物油应控制适当的精制深度。金属铜、铅对矿物油的热氧老化有显著催化作用，使用中应避免与之直接接触。为抑制矿物油的老化，可加入抗氧剂。轻度老化的矿物油可用白土精制、过滤，以恢复其绝缘性能。严重老化的矿物油则需要用与精炼时相似的方法进行再生处理。

kuangtu

框图

（block diagram） 表示系统中每个环节的功能及其与其他环节的关系的图，又称方框图或方块图。它以若干矩形的框的联系来表示系统的结构，因而也称为结构图。简单的框图仅表示系统的组成和连接，另一种则还表明环节的传递函数和系统中信号的流向。图1表示一个框图单元。其中$G(s)$为传递函数，$X(s)$为输入信号，$Y(s)$为输出信号。

误差检测器框图 图2表示误差检测器的框图，它的输出信号$E(s)$等于控制系统的输入信号$R(s)$和反馈信号$C(s)$之差。图中带×的圆表示进行相加运算，每个箭头上的加号或减号，表示信号是相加还是相减。进行加、减的量，应具有相同的量纲和单位。圆中也可以带Σ或不带另加的记号。



图1 框图单元 图2 误差检测器框图

闭环系统框图 图3表示一闭环系统框图。图中，$R(s)$为输入信号，$C(s)$为输出信号，$B(s)$为反馈信号，$E(s)$为误差信号，$G(s)$为前向传递函数，$H(s)$为反馈传递函数。于是，有

图3 闭环系统框图

$$开环传递函数=B(s)/E(s)=G(s)H(s)$$

$$闭环传递函数=G(s)/R(s)=\frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$$

反馈传递函数$H(s)=1$的系统称为单位反馈系统，其闭环传递函数为$\frac{G(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)}$。

框图绘制和简化 框图绘制步骤是：先写出描述每一环节的动态特性方程，然后假定初始条件为零，取拉普拉斯变换，得到每一方框的传递函数，最后将这些方框单元组成整体的框图。画框图时，一个方框的输出量不受其后的方框影响，才能串联连接。如果环节之间存在着负载效应，则必须予以考虑，归并为一个单一的方框。

复杂的框图常需简化。简化的一般法则是：移动分支点和相加点，交换相加点，减少内反馈回路等。简化应符合两条原则：①前向通路中传递函数的乘积应保持不变；②回路中传递函数的乘积应保持不变。图4示出框图简化的例子。图中$R(s)$、$C(s)$、$G(s)$和$H(s)$分别简写为R、C、G和H。简化过程为（a）→（b）→（c）→（d）→（e）。

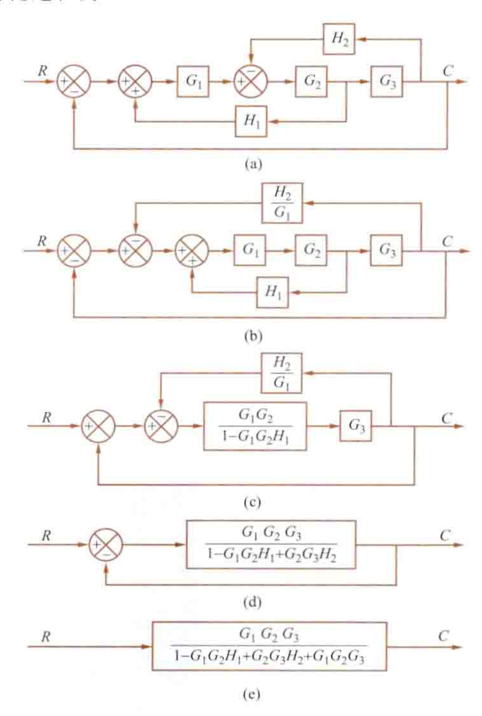


图4 框图简化示例

kuosan

扩散

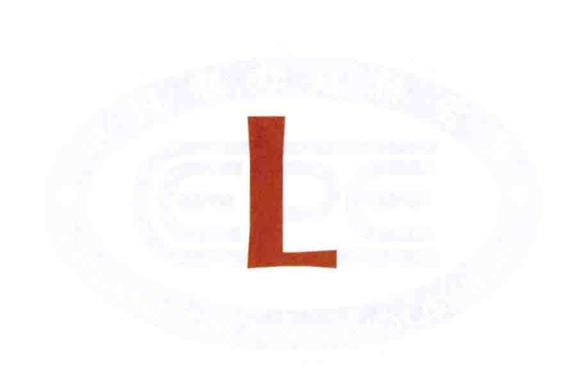
（diffusion） 由于电子、原子、分子和离子等微观粒子热运动引起的，使其本身从密度高的区域流向密度低的区域的物质输运现象。在气体放电中，扩散运动使得带电粒子从电离区域流失。扩散运动对于研究流注放电和火花放电通道是很重要的。

由于扩散运动，粒子数密度n随时间t和空间坐标x、y、z的变化，用扩散方程描述为

$$\frac{\partial n}{\partial t}=D\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)n=D\nabla^2 n$$

式中D是扩散系数，它表征扩散的速率。D和粒子及气体的种类有关。D值随温度升高、粒子运动加快而增大；随气压增加、碰撞的平均自由行程减少而降低。电子的扩散系数要比离子的大得多。

在实际的气体放电中，电子和离子之间的相互作用不容忽视，不能认为电子和离子可以独立地扩散。因为电子的扩散系数比离子的大得多，电子离开气体放电的通道要快得多，而在原处剩下净的正离子。正、负电荷分离而产生的电场要加速正离子的扩散并阻碍电子的扩散。最后，使得电子和正离子以同样的速度扩散。这种扩散叫做双极性扩散。当电子温度和离子温度相等时，双极性扩散系数比电子的扩散系数小得多，约为离子扩散系数的2倍。



LC zhengxianbo zhendangqi

LC正弦波振荡器 (LC sine-wave oscillator) 以LC谐振回路作反馈电路的反馈型正弦波振荡电路。LC振荡器的放大电路主要由晶体管组成。自激振荡频率基本上取决于谐振回路的电感 L 和电容 C，振荡幅度主要受有源器件的非线性和电源电压的大小限制。

LC振荡器因谐振回路具有很高的选择性，即使放大电路工作在非线性区，振荡电压波形仍非常接近于正弦波。但因谐振元件 L、C 之值限于体积不宜过大，故振荡频率不宜太低，一般为几百千赫至几百兆赫，最高可达1000MHz以上。频率稳定度一般为 $10^{-2}\sim10^{-4}$ 数量级。谐振元件 L、C 的数值易于调节，可用来改变振荡频率，因而为广播、通信、电子仪器、感应加热等电子设备所广泛采用。

LC振荡器按电感、电容在电路中的接法不同可以分为电感三点式、电容三点式及其改进型、变压器耦合式振荡器等主要类型。

电感三点式振荡器 又称哈特莱振荡器。电路如图1所示，构成正反馈的 L_1、L_2 分别接在晶体管集电极—发射极和基极-发射极之间，C 接在集电极-基极之间。

振荡频率为 $f_0=1/(2\pi\sqrt{LC})$，式中 $L=L_1+L_2+2M$，M 为 L_1 与 L_2 之间的互感。

这种振荡器电路简单，容易起振，频率调节方便，但波形一般不太好，含有较多的高次谐波分量。振荡频率可从几百千赫到几十兆赫，频率稳定度一般可达 10^{-4}。

图1中电感三点式振荡器晶体管接成共射放大电路，也可接成共基放大电路。

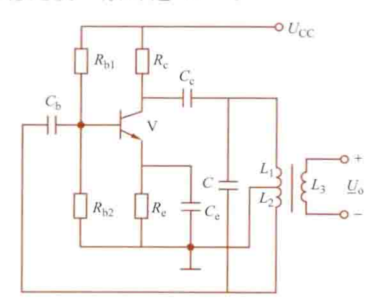


图1 电感三点式振荡器

电容三点式振荡器 又称科皮兹振荡器。电路如图2所示，构成正反馈的 C_1、C_2 分别接在晶体管集电极-发射极和基极-发射极之间，L 接在集电极-基极之间。

振荡频率为 $f_0=1/(2\pi\sqrt{LC})$，式中 $C=C_1C_2/(C_1+C_2)$。

该电路反馈取自电容两端电压，容抗随频率升高而减小，因而高次谐波将被抑制，故输出波形好，工作频率可达数百兆赫，但极间电容变化对频率稳定性影响较大，频率调节比较困难。

图2中电容三点式振荡器晶体管接成共射极放大电路，也可接成共基极放大电路。

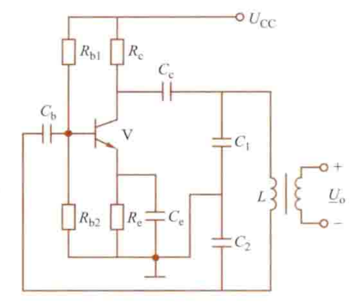


图2 电容三点式振荡器

电容三点式改进型振荡器 在电容三点式振荡器电路的 L 支路中，串联一个比 C_1 和 C_2 小得多的电容 C_3（见图3），振荡频率将近似为 $f_0\approx1/(2\pi\sqrt{LC_3})$。这样改进后，减轻了极间电容对频率稳定性的影响，也便于频率调节。改进后的电路又称为克拉泼振荡器。

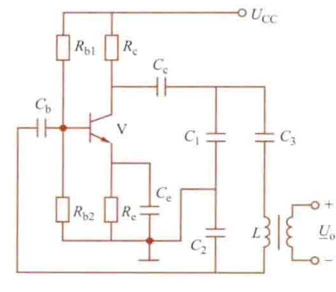


图3 电容三点式改进型——克拉泼振荡器

如果在克拉泼振荡电路的 L 两端再并联一个小电容 C_4，如图4所示。这时振荡频率为 $f_0\approx1/[2\pi\sqrt{L(C_3+C_4)}]$。这样改进的电路称为西勒振荡器。工作频率范围内振幅比较平坦，适于作可变频率振荡器。

变压器耦合式振荡器 又称调集振荡器。通过变压器来实现反馈信号的耦合，电路如图5所示。LC谐振回路接在晶体管的集电极-发射极之间，L_1 为变压器的一次绕组，L_2 为二次绕组，通过互感使基极和发射极之间得到一个反馈信号，变压器一、二次绕组的极性关系如图中的同名端所示，用以获得产生振荡所需的正反馈。

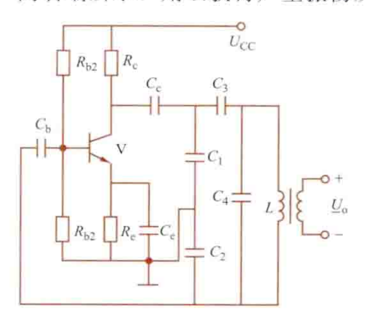


图4 电容三点式改进型——西勒振荡器

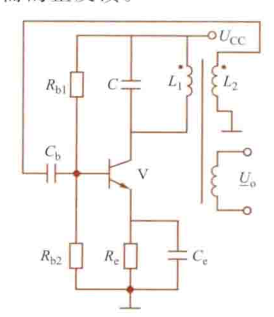


图5 变压器耦合式振荡器

当振荡频率 f_0 低于晶体管的共射截止频率 f_β 时，振荡频率为 $f_0=1/(2\pi\sqrt{L'C})$，式中 L' 为一等效电感，包含其他绕组的影响。变压器耦合式振荡器一般适用于产生几千赫到几兆赫的正弦波振荡，由于采用变压器耦合方式，容易实现阻抗匹配，也容易起振，调节频率方便。

由以上分析可知，LC振荡器适用于产生高频信号的场合，不宜用于产生低频信号。因为随 f_0 的减小，L 值要以平方关系增大，制造会出现困难。

Lapulasi bianhuan

拉普拉斯变换 (Laplace transform) 见动态电路复频域分析。

Lapulasi fangcheng

拉普拉斯方程 （Laplace's equation） 以法国数学家、天文学家P. S. 拉普拉斯（P. S. Laplace，1749—1827）的姓氏命名的线性二阶齐次偏微分方程。在电磁学、力学、热学等学科中，拉普拉斯方程用来描述静止场（不随时间变化的场）的特性。令 $F(x, y, z)$ 是被研究的场量，x、y、z 是三维空间直角坐标系的三个坐标量，拉普拉斯方程的形式是

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 F}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 F}{\partial z^2}=0$$

采用另一种坐标系，拉普拉斯方程的形式将随之改变。为了脱离坐标系的具体形式，常将拉普拉斯方程写成

$$\nabla^2 F=0$$

静电场中的拉普拉斯方程　三维空间的某个区域 Ω 中充满了同一种各向同性的线性电介质，区域 Ω 内没有电荷分布。将 Ω 中的电位记作 φ，则静电场的规律由拉普拉斯方程描述。

恒定磁场中的拉普拉斯方程　区域 Ω 中充满了同一种各向同性的线性磁介质，Ω 中没有电流分布。区域 Ω 是单连通的。将 Ω 中的磁标位记作 φ_m，恒定磁场的规律由拉普拉斯方程 $\nabla^2\varphi_m=0$ 描述。

恒定电场中的拉普拉斯方程　区域 Ω 中充满了同一种各向同性的线性导电体，Ω 中没有外电源，导电体中的电位 φ 满足拉普拉斯方程 $\nabla^2\varphi=0$。

拉普拉斯方程的解　拉普拉斯方程的解，取决于区域 Ω 边界上的场量。边界面两侧场量满足的约束关系称为边界条件。求解静止场通常是在给定的边界条件下解拉普拉斯方程。对于区域形状简单的场，可用解析方法求解拉普拉斯方程。也可用实验方法求解拉普拉斯方程，即测量出区域 Ω 中各处的场量。对于边界形状复杂的场，可利用计算机用数值方法求解拉普拉斯方程。随着计算机技术的发展，数值方法得到广泛的应用（见电磁场数值计算）。

泊松方程　以法国数学家、物理学家S. D. 泊松（S. D. Poisson，1781—1840）的姓氏命名的线性二阶非齐次偏微分方程，它的一般形式是 $\nabla^2 F=f(f\neq 0)$。如在静电场中，若区域 Ω 内分布有自由电荷体密度 ρ 的电荷时，电位 φ 满足泊松方程

$$\nabla^2\varphi=-\frac{\rho}{\varepsilon}$$

其中常量 ε 为充满 Ω 的、同一种各向同性线性电介质的电容率。

Laosi-Heerweici wending panju

劳斯-赫尔维茨稳定判据 （Routh-Hurwitz stability criterion） 根据线性定常控制系统闭环特征方程式的系数，不用直接求解特征方程式就可以判断系统是否稳定的判据。

劳斯稳定判据　系统特征方程式全部根中，实部为正数的根的个数，等于劳斯阵列中第一列元素改变符号的次数。运用这一判据的方法如下：

（1）列出系统特征方程式 $a_0s^n+a_1s^{n-1}+a_2s^{n-2}+\cdots+a_{n-1}s+a_n=0$，式中各项系数均为实数，$a_0>0$。

（2）线性定常控制系统稳定的必要条件（并非充分条件）是特征方程式的所有系数都是正数。如果系数既有正数，又有负数或零，则必有实部是正数的复根或纯虚根，系统是不稳定的。

（3）作劳斯阵列

$$\begin{array}{c|llllll}
s^n & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & a_8 & \cdots \\
s^{n-1} & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & a_9 & \cdots \\
s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & \cdots & \\
s^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & \cdots & \\
s^{n-4} & d_1 & d_2 & d_3 & \cdots & & \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & & \\
s^0 & r_1 & & & & &
\end{array}$$

系数 b_1、b_2 等根据下式计算

$$b_1=\frac{1}{a_1}(a_1a_2-a_0a_3),$$

$$b_2=\frac{1}{a_1}(a_1a_4-a_0a_5),\cdots$$

一直进行到其余的 b 值全部等于零为止。类似地

$$c_1=\frac{1}{b_1}(b_1a_3-a_1b_2),$$

$$c_2=\frac{1}{b_1}(b_1a_5-a_1b_3),\cdots$$

$$d_1=\frac{1}{c_1}(c_1b_2-b_1c_2),$$

$$d_2=\frac{1}{c_1}(c_1b_3-b_1c_3),\cdots$$

这种过程一直进行到 s^0 行被算完为止。完整的劳斯阵列呈三角形。线性定常控制系统稳定的充分必要条件是其特征方程式的全部系数都是正数，且劳斯阵列第一列中的元素都具有正号。

例如，系统的特征方程为 $s^5+s^4+10s^3+72s^2+152s+240=0$，劳斯阵列为

$$\begin{array}{c|lll}
s^5 & 1 & 10 & 152 \\
s^4 & 1 & 72 & 240 \\
s^3 & -62 & -88 & \\
s^2 & 70.6 & 240 & \\
s^1 & 122.6 & & \\
s^0 & 240 & &
\end{array}$$

阵列中第一列的数有两次改变符号，所以系统不稳定。

实际上，特征方程的根为 -3，$-1\pm j\sqrt{3}$ 和 $+2\pm j4$，有两个根实部为正。

赫尔维茨判据　根据系统特征方程式 $a_0s^n+a_1s^{n-1}+a_2s^{n-2}+\cdots+a_{n-1}s+a_n=0$ 的系数作行列式如下：

$$\begin{vmatrix}
a_1 & a_0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots \\
a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & \cdots & \cdots \\
a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & \cdots & \cdots \\
a_7 & a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & \cdots & \cdots \\
a_9 & a_8 & a_7 & a_6 & a_5 & \cdots & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & a_n
\end{vmatrix}$$

行列式的阶数为 n。在行列式的主对角线上，从左上角到右下角的元素，依次为 $a_1, a_2, \cdots, a_n$。在主对角线以右的元素，下标依次减1，至下标为零为止；在主对角线以左的元素，下标依次增1，至下标为 n 为止。其余元素为零。

作上述行列式后，再计算其各阶前主子式 $\Delta_i(i=1,$

2,…,n)，即

$$\Delta_1=a_1,\quad \Delta_2=\begin{vmatrix}a_1 & a_0\\ a_3 & a_2\end{vmatrix},$$

$$\Delta_3=\begin{vmatrix}a_1 & a_0 & 0\\ a_3 & a_2 & a_1\\ a_5 & a_4 & a_3\end{vmatrix},\cdots$$

线性定常控制系统稳定的充分必要条件：在 $a_0>0$ 的情况下，上述行列式的各阶前主子式均大于零。

上述两个判据，由劳斯和赫尔维茨分别给出，形式上也有差别。但可证明，二者是一致的。因此合称劳斯-赫尔维茨判据。

这一判据可以判断线性定常控制系统稳定与否，即判断系统的绝对稳定性，但不能指出如何改善系统的相对稳定性，也不能指出采取什么措施能使不稳定的系统达到稳定。

Lengci dinglü

楞次定律 (Lenz law) 见电磁感应。

lisan kongzhi xitong

离散控制系统 (discrete control system) 系统中一处或若干处的信号对于时间为离散型的系统。与连续系统不同，连续系统中的控制信号、输出信号、偏差信号和反馈信号全部是连续型的时间函数；离散控制系统中一处或若干处的信号是离散型（脉冲序列或数码）的，即仅在离散时刻 0，T，$2T$，…上定义的。离散控制系统又称离散系统、离散时间系统、采样数据系统或离散数据系统。

离散系统的信号为时间上不连续的序列，用“序列 $x(nT)$”表示，也可简写为 $x(n)$，$x(n)$ 仅对 n 为整数有意义（$n=0$，±1，±2，…），如图1所示。$x(n)$在各离散时刻的值为…，$x(-2)$，$x(-1)$，$x(0)$，$x(1)$，$x(2)$，…理论上可用无穷个数值表示，它是连续时间信号的采样值，又称为采样信号。在很多情况下，$n\geqslant0$，即为 $x(0)$，$x(1)$，$x(2)$，…为了便于计算机识别，离散信号的值要用二进制数码近似表示，这是量化过程。经量化后的离散信号，称为数字信号。在实际应用中，离散信号和数字信号常不予以区分。量化过程引起的误差，称为量化误差。

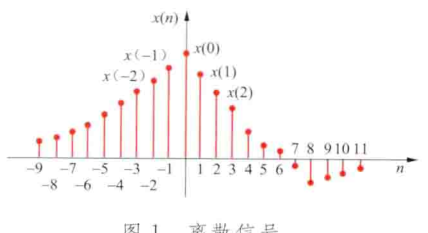


图1 离散信号

图2是一采样数据系统的框图及系统中的信号。系统由采样保持器（S/H）、模/数变换器（A/D）、数字信号处理环节和数/模变换器（D/A）组成。

(1) 采样保持器（S/H）：由采样开关S和一零阶保持器组成，如图2（b）所示。采样开关每隔 T 秒闭合一次，T 为采样周期。输入的连续信号 $x(t)$ 经采样后转变为发生在0，T，$2T$，…时的一串脉冲，脉冲宽度为采样开关闭合的时间，脉冲宽度与 T 相比可近似视为零。脉冲信号为仅在离散时刻0，T，$2T$，…有值的理想采样信号。为保证信号传递，采样信号必须保持一段时间，零阶保持器能使在两个相邻采样间隔之间将采样信号保持为常量，如图2（d）所示。

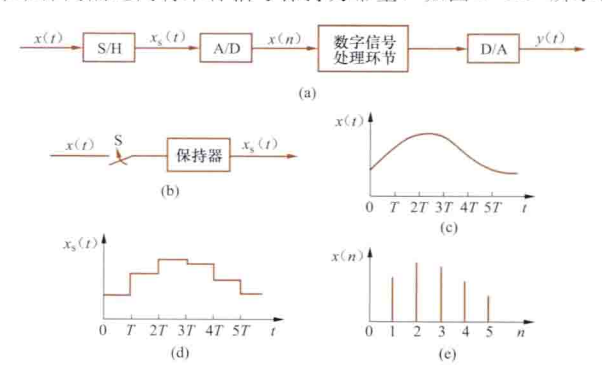


图2 离散系统与信号

(a) 离散系统；(b) S/H示意图；(c) 输入信号；(d) A/D输入信号；(e) A/D输出数字信号

(2) 模/数变换器（A/D）：将采样保持器的输出信号 $x_s(t)$（模拟量）量化成二进制的数字信号 $x(n)$，如图2（e）所示。采样信号的保持时间，必须满足A/D变换所需的时间。

(3) 数字信号处理环节：主要由计算机、微处理器等硬件设备组成，收集数字信号，按系统设计要求进行运算处理，其输出也是数字信号。

(4) 数/模变换器（D/A）：将处理好的数字信号变换为平滑的连续信号 $y(t)$（模拟量）。离散系统中的采样周期 T 与输入的连续信号中的最高次频率之间，必须满足采样定理，以保证信号的再现。（见采样和信号再现）

有线性的离散系统，也有非线性的离散系统，前者满足叠加原理。离散系统输出量与输入量之间的关系可用差分方程表示。使用 Z 变换，可将差分方程变为代数方程。这与在连续系统中使用拉普拉斯变换可将微分方程变为代数方程相似。离散系统也可用状态空间法求解。

除含有采样数据信号的离散系统外，还有自然的离散系统，例如，人口的增长和迁徙过程只能用离散数字描述。

lisan kongzhi xitong wendingxing

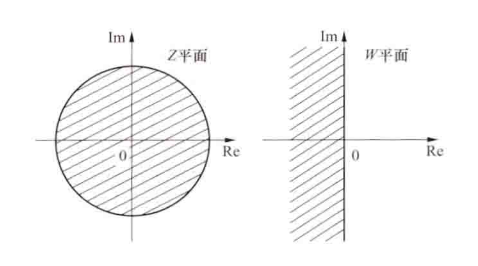
离散控制系统稳定性 (discrete control system stability) 离散控制系统受到扰动后，其运动能保持在有界的区域内或回到原平衡状态的性能。

线性定常连续控制系统稳定的充分必要条件是，它的全部闭环极点（亦即微分方程的全部特征根）都位于复数平面的左半平面。

类似地，线性定常离散控制系统稳定的充分必要条件是，它的闭环 Z 传递函数的全部极点（亦即差分方程的全部特征根）的绝对值应小于1，即这些根应分布在 Z 平面的单位圆内。因为 $z=\mathrm{e}^{Ts}$（见Z变换法），$s=\sigma+\mathrm{j}\omega$，$|z|=\mathrm{e}^{T\sigma}$，$\angle z=\omega T$，所以，在 Z 平面上，圆心位于原点的单位圆内部是与左半 s 平面相对应的。

劳斯-赫尔维茨稳定判据 作 $Z-W$ 平面变换：z 和 w 都是复数，$z=p+\mathrm{j}q$，$w=u+\mathrm{j}v$，令 $z=(1+w)/(1-w)$，或 $w=(z-1)/(z+1)$，则 $w=\dfrac{(p^2+q^2)-1}{(p+1)^2+q^2}+\mathrm{j}\dfrac{2q}{(p+1)^2+q^2}$，由 $|z|^2=p^2+q^2$ 知，对于所有幅值大于1

的 z，w 的实部均为正；对于幅值小于 1 的 z，w 的实部均为负。于是，可与连续系统一样经 W 平面用劳斯-赫尔维茨稳定判据来判定离散系统的稳定性。例如，离散系统的特征方程式为 $z^3-1.5z^2-0.25z+0.4=0$，作 $Z-W$ 平面变换，得 $1.85w^3+5.95w^2+0.55w-0.35=0$，系数符号有正也有负，应用劳斯-赫尔维茨稳定判据，知系统不稳定。



Z－W 平面变换影像图

奈奎斯特稳定判据 遵照在离散控制系统情况中的表述形式，也可应用。

此外，离散控制系统稳定性的检验还有 Schur-Cohn 检验和 Jury 检验，也能应用李雅普诺夫第二方法。

lizіliu

离子流 (ion flow)

直流下电晕放电形成的空间离子在电场力作用下的移动。电极施加直流电压发生电晕放电后，电极周围产生大量相反极性的离子，这些离子在直流电场力作用下作单一方向移动，形成稳定的离子流。

离子流是高压直流输电的特有现象，也是与交流输电线路电磁环境参数的重要差别之一。图 1 所示是±800kV 直流输电线路。交流输电线路导线发生电晕时，由于电压的交替变化，电晕所产生的离子绝大部分被限制在导线附近运动或被中和，离子基本不会到达地面附近，即交流线路地面附近电场无须考虑离子流。而高压直流输电线路的电场则比较复杂，在导线无电晕（或不计及电晕及其产生的离子）时，导线周围及线下地面的电场只决定于导线电压和线路的几何尺寸，即仅存在静电场，或所谓的标称场。导线电晕时，离子在电场力的作用下，向反极性的导线和地面运动。这样在两极导线和极导线与地之间都存在离子，如图 2 所示。这些离子同时也产生电场，从而改变了地面的场强，形成了合成场强。合成场强的大小主要取决于导线电晕放电的严重程度，最大合成电场有可能比标称电场大很多，可达它的 3～3.5 倍。



图 1　向家坝—上海±800kV 直流输电线路（吴石光　摄）

由导线向大地流动的离子电流，遇到对地绝缘的物体，将附着在该物体上形成物体带电现象，从而可能引起暂态电

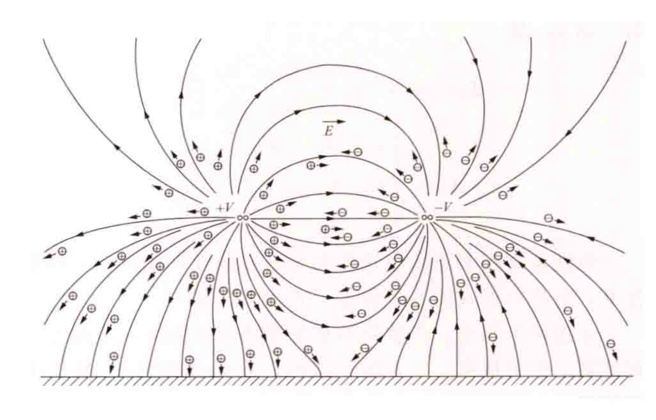


图 2　直流输电线路周围离子流示意图

击。人在直流输电线路线下活动，可能产生的效应有：人在高压直流电场下的直接感受、人截获离子电流的感受、人接触接地和绝缘物体后的感受。

研究表明，在直流输电线路下人或物体所截获的离子电流比起始感觉水平低很多。在美国邦纳维尔电力局（BPA）的试验场，±600kV 直流线路下测得的地面合成电场强度为 40kV/m，人在线路下举手，人体截获的电流仅为 0.003～0.004mA。有研究表明，流过人体的直流电流要比交流电流大 5 倍以上，才会有同样的感受程度。站立在直流输电线路线下人的截获电流，通常比直流感觉的临界值小 2 个数量级，因此一般不会有任何感觉。在中国，对于±500kV 直流输电线路，线路下方合成场强限值为 30kV/m，离子流密度的限值为 100nA/m²。

Likati fangcheng

黎卡提方程 (Riccati equation)

见线性二次型最优控制。

Liyapunuofu fangfa

李雅普诺夫方法 (Lyapunov method)

俄国学者李雅普诺夫（Л. М. Ляпунов）提出的分析稳定性的方法，包括第一法（亦称间接法），和第二法（亦称直接法）。适用于分析线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统的稳定性，是更为一般的稳定性分析方法。

李雅普诺夫意义下的稳定性　考虑一零输入系统，其状态方程为 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},t)$，式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量。设状态空间原点是平衡点，即 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{0},\ t)=\boldsymbol{0}$。如果对于每一充分接近原点的初始状态 $\boldsymbol{x}(t_0)$，$\boldsymbol{x}(t)$ 对所有 t 保持接近于原点，则称系统在原点是在李雅普诺夫意义下稳定的。如果原点是稳定的，且当 $t\to\infty$ 时 $\boldsymbol{x}(t)$ 事实上趋近于原点，则称系统在原点是渐近稳定的。如果对于任意初始状态（无论它距原点远近如何），系统是渐近稳定的，则称系统是大范围渐近稳定的。

向量 $\boldsymbol{x}$ 的标量函数 $V(\boldsymbol{x})$ 的符号确定性

(1) 正（或负）定性：若在球域 $\|\boldsymbol{x}\|\leqslant k$ 内的所有点上 $V(\boldsymbol{x})>0$（或 <0），且仅当 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 时有 $V(\boldsymbol{0})=0$，则称标量函数 $V(\boldsymbol{x})$ 是正（或负）定的。这里 $\|\boldsymbol{x}\|$ 为 n 维向量 $\boldsymbol{x}$ 的欧几里德（Euclid）范数，$\|\boldsymbol{x}\|=(x_1^2+x_2^2+\cdots+x_n^2)^{1/2}$。

(2) 正（或负）半定性：若在球域 $\|\boldsymbol{x}\|\leqslant k$ 内的所有点上 $V(\boldsymbol{x})\geqslant 0$（或 $\leqslant 0$），且 $V(\boldsymbol{0})=0$，则称标量函数 $V(\boldsymbol{x})$ 是正（或负）半定的。

(3) 不定性：若对于任意小的 k，在球域 $\|\boldsymbol{x}\| \leqslant k$ 内，$V(\boldsymbol{x})$ 既有正值又有负值，则称标量函数 $V(\boldsymbol{x})$ 是不定的。

李雅普诺夫第一法　李雅普诺夫第一法论证了用线性系统近似地代替非线性系统是否会在稳定性问题上得出错误结论。第一法的结果是，线性化后系统特征方程的根有以下三种情形：

(1) 都在左半复平面，则线性化后的系统是渐近稳定的，原系统是渐近稳定的。

(2) 只要有一个在右半复平面，则线性化后的系统是不稳定的，原系统也是不稳定的。以上两种情形，都可以按线性化后的系统判断原系统的稳定性。

(3) 有一个或几个落在虚轴上，其余在左半复平面，则原系统的运动稳定性与被忽略的高阶项有关，不能按线性化后的方程作判断。

李雅普诺夫第二法　若系统所具有的能量是状态向量 $\boldsymbol{x}$ 的函数，并且随着时间的推移能量不断减小，一直达到平衡状态处减到最小值，则系统是渐近稳定的。李雅普诺夫构造了一个能量型的函数，称为李雅普诺夫函数 $V(\boldsymbol{x})$，只要此函数符合李雅普诺夫提出的稳定性准则，无须求出系统方程的解，就可以判断系统的稳定性。它在实际中应用广泛。

李雅普诺夫稳定性定理：

定理一　设系统的状态方程为 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$，其平衡状态为状态空间原点，如果在原点某邻域内存在一个具有连续的一阶偏导数的标量函数 $V(\boldsymbol{x})$，并且满足以下条件：① $V(\boldsymbol{x})$ 是正定的；② $\dot{V}(\boldsymbol{x})$ 是负定的，则系统在原点处的平衡状态是渐近稳定的。此外，如果在整个状态空间上述条件满足，且随着 $\|\boldsymbol{x}\| \to \infty$，有 $V(\boldsymbol{x}) \to \infty$，则在原点处的平衡状态是在大范围内渐近稳定的。

定理二　系统的状态方程、平衡状态和标量函数 $V(\boldsymbol{x})$ 与定理一相同，且在原点某邻域内满足以下条件：① $V(\boldsymbol{x})$ 是正定的；② $\dot{V}(\boldsymbol{x})$ 是负半定的；③ $\dot{V}[\boldsymbol{\Phi}(t;\boldsymbol{x}_0,t_0),t]$ 在非零状态不恒等于零，则在系统原点处的平衡状态是渐近稳定的。式中 $\boldsymbol{\Phi}(t;\boldsymbol{x}_0,t_0)$ 表示 $t=t_0$ 时从 $\boldsymbol{x}_0$ 出发的解轨迹。

定理三　系统的状态方程、平衡状态和标量函数 $V(\boldsymbol{x})$ 与定理一相同，且在原点某邻域内满足以下条件：① $V(\boldsymbol{x})$ 是正定的；② $\dot{V}(\boldsymbol{x})$ 是负半定的，则系统在原点处的平衡状态在李雅普诺夫意义下是稳定的。

这样，判定稳定性问题就转化为 $V(\boldsymbol{x})$ 的选择。如果选了一个函数不能表明系统的稳定性，其他函数还可以尝试。如果用一个函数做检验稳定性条件不满足，这不表明系统是不稳定的。上述定理给出的是稳定性的充分条件而不是必要条件。

对于一特定的问题寻找李雅普诺夫函数还无通用的方法，常用的方法见变量－梯度法和克拉索夫斯基方法。

此外，有下述的不稳定性定理：

定理四　设系统的状态方程为 $\dot{\boldsymbol{x}}=f(\boldsymbol{x})$，其平衡状态为状态空间原点，如果存在一个标量函数 $W(\boldsymbol{x})$，它具有连续的一阶偏导数，且满足条件：① $W(\boldsymbol{x})$ 在原点的某一邻域内是正定的；② $\dot{W}(\boldsymbol{x})$ 在同样的邻域内也是正定的，则原点处的平衡状态是不稳定的（$\dot{W}=\mathrm{d}W/\mathrm{d}t$）。

lixiang bianyaqi

理想变压器 (ideal transformer)

从数值上，输入电压和输出电压之比等于其输出电流和输入电流之比的二端口元件。在任何时刻，理想变压器获得的总功率恒为零。因此，它既不耗能又不储能，纯粹是一个传输能量和变换信号的元件。

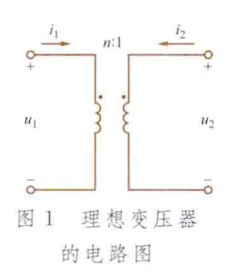


图 1　理想变压器的电路图

在电路理论中，理想变压器的电路如图 1 所示。在图示的参考方向和同名端情况下，其一次侧与二次侧的电压和电流具有下列关系

$$\frac{u_1}{u_2}=\frac{N_1}{N_2}=n$$

$$-\frac{i_1}{i_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{n}$$

式中 N_1、N_2 分别为一次和二次绕组的匝数，n 称为匝数比或变比。理想变压器除了变换电压和电流外，还可以变换阻抗。在二次侧接上复阻抗 $\underline{Z}$，则一次侧的入端阻抗将是 $\underline{Z}_i=n^2\underline{Z}$（见图 2）。

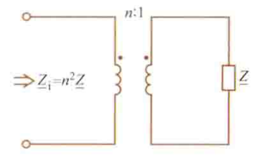


图 2　理想变压器用于变换阻抗

理想变压器是从实际变压器中抽象出的理想化模型。实际的双绕组铁芯变压器在忽略损耗、漏磁和励磁电流时，它就成为理想变压器。

实际变压器达不到上述理想化条件。在理想变压器模型的基础上，附加上一些电阻、电感，可以组成实际变压器的模型，如图 3 所示。图中，r_1、L_{s1}、r_2、L_{s2}，分别为一、二次绕组的电阻和漏电感；L_m 为励磁电感，电阻 r_m 则反映变压器的铁芯损耗。

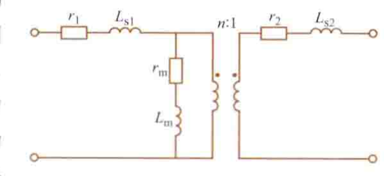


图 3　实际变压器的模型

limin dianzu cailiao

力敏电阻材料 (strain sensitive resistance materials)

对应变效应敏感的电阻材料。这种材料在受到拉伸或压缩时，其电阻值会随应变而发生变化。

1856 年 W. 汤姆森（W. Thomson）发现金属材料的应变效应，1937 年制成第一片应变片后，某些金属和合金材料被用于制作应变电阻元件。1954 年 C. S. 斯密司（C. S. Smith）发现锗和硅有压阻效应后，半导体就成为此类材料中的新材料。常用的金属（合金）应变电阻材料有镍铜合金、锰铜合金、镍铬铝铁合金、镍铬合金和铂铱合金。它们的应变系数为 2～3，电阻温度系数小，工作温度范围宽，稳定性好。半导体应变电阻材料主要有硅、锗、砷化镓、锑化铟等。半导体的应变系数大（50～200）、响应快、可靠性高，但温度系数较大、工作温度范围较窄。

应变电阻材料用于制造电阻应变元件和应变式传感器，广泛用于检测应力、应变，测量控制力、扭矩、位移、加速度等。这种材料的制品种类繁多、性能各异。各种应变元件的性能见表。测量各种条件下的应力、应变时，应选用不同的应变元件；注意应变元件的贴装方法；高温、高压测量时，应消除温度或压力效应的影响。

应变电阻材料的发展趋势主要是开发半导体材料，特别

是各种二元、三元化合物半导体和其他无机（包括半导体陶瓷）、有机半导体材料。

各种应变元件的性能

名　称	应变系数	电阻值 (Ω)	应变系数的温度系数 ($\times 10^{-3}$℃$^{-1}$)	电阻温度系　数 ($\times 10^{-6}$℃$^{-1}$)	工作温度 (℃)	最大应变 ($\times 10^{-5}$)
体型金属	1.8～2.2	60～1000	≈0	±20	−270～+650	50 000
金属薄膜	1.8～20	10～10 000	≈0	±20		4000～6000
体型半导体	−80～+150	60～10 000	−1.1～−4.5	700～7000	−30～+250	4000
扩散及外延型硅半导体	−80～+150	100～10 000	−1.1～−4.5	700～7000	−30～+150	4000
半导体薄膜	30	120～1000	≈0.5	−200	−150～+200	2000～3000

lianjie zhuangpei chengxu

连接装配程序　（linking loader）　把若干个经过编译或汇编所产生的目标模块连接装配成一个可执行程序的一种实用程序。随着计算机的应用和开发的不断深入，源程序规模越来越大，需要由多个人合作进行分块程序设计，于是出现了将源程序按结构分块分别进行编译的方法，相应就产生了连接装配程序。

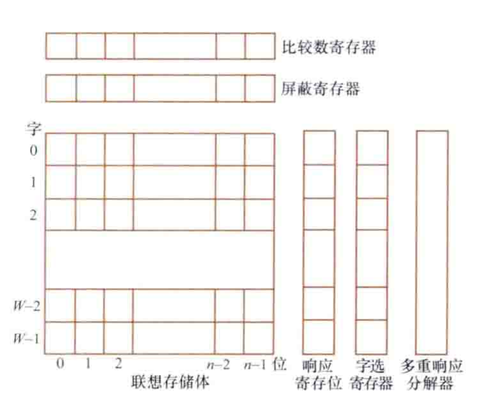
连接装配程序组合了再定位装配程序和连接编辑程序的功能。①再定位装配程序：将一个具有相对地址的程序进行再定位并加工成绝对地址。②连接编辑程序：将各个分别编译的模块和整个程序中所涉及的在程序库中的目标模块调入内存并连接在一起。另外还有覆盖加工、程序修改和库访问等功能。

引入连接装配处理不仅使大型程序设计便于分工，能按模块分别编程和调试，而且为用户建立和调用程序库提供了方便。程序库收集了常用或用户自己所需的一些功能模块，在编程时可直接引用程序库中的功能模块，就像引用函数一样。

lianxiang cunchuqi

联想存储器　（associative memory）　按给定内容的特征对各存储单元进行并行访问的存储器，亦称按内容访问存储器。与人脑的"联想"功能相似，其特点是速度快，但结构复杂，造价较高，常用于多级存储体系的地址映射部件和大型数据库实时检索和更新、图像处理、计算机视觉、实时人工智能计算等，还可用于构成集并行和联想技术于一体的联想处理机。

联想存储器基本组成如图所示。联想存储体每一单元有逻辑比较与读写控制等电路。查找的变量放在比较数寄存器内，经屏蔽寄存器屏蔽比较数寄存器的部分位数，把未屏蔽部分作为查找变量送入联想存储体。同时，各存储单元的比较逻辑电路将其内容与查找变量比较，如果满足查找要求，则响应寄存器对应位置1，否则为0。当有多重响应单元时，如要读出，则由多重响应分解器将其逐一分解，确定地址顺序读出。如要写入，则并行写入这些响应单元。有时也可根据单元地址写入信息。



联想存储器组成框图

联想存储器最基本的逻辑操作是全等比较，通过相应算法或在存储单元增加逻辑电路可完成多种比较操作，包括不等、大于、小于、区间内、区间外等。随着集成电路技术的发展，其造价将降低，并将得到越来越多的应用。

lingdian

零点　（zero）　见传递函数。

lingshuru xiangying

零输入响应　（zero input response）　线性电路或系统在没有外加激励时的响应。零输入响应是由非零初始状态引起的，以线性电路为例，它是由初始时刻电容中的电场储能、电感中的磁场储能所引起的。零输入响应由电路拓扑结构、元件参数和储能情况决定。零输入响应与初始状态既满足可加性又满足齐次性。若初始时刻储能为零，在没有输入激励作用的情况下，电路响应为零，即零输入响应等于零。

线性电路或线性系统的全响应可分解为零输入响应与零状态响应。

lingzhuangtai xiangying

零状态响应　（zero state response）　在零初始状态下，由初始时刻开始施加于线性系统或线性电路的输入激励所产生的响应。

零状态响应由电路拓扑结构、元件参数和输入激励决定。零状态响应与输入激励既满足可加性又满足齐次性。线性电路或线性系统的全响应可分解为零状态响应和零输入响应。

求零状态响应的一种重要方法是卷积积分法。

liuzhu fangdian lilun

流注放电理论　（streamer theory of gas discharge）　解释气体击穿过程的基本理论之一。该理论和汤森放电理论相互补充（见气体击穿理论），认为：在气体击穿的过程中，除了汤森放电理论中所阐述的电离现象之外，空间电荷引起的电场畸变以及间隙中的光电离也是很重要的影响因素。

汤森放电理论能解释许多气体击穿现象，但这种理论比较适用于 pd 值（间隙气压 p 和间隙距离 d 的乘积）较小的情况。当 pd 值较大，一般说来，当 $pd \geqslant 0.1 \sim 0.2$MPa·cm 时，汤森放电理论不再适用。按照汤森放电理论，气体间隙的击穿时间较长，当间隙距离为 1cm 时，这个时间约为 100ns；而实际观察得到的时间要小得多，约为 10ns。按汤森放电理论，气体放电的通道应是均匀的一片，但由实验观察到有的通道很细，而且具有分枝的形状。实验还表明：间隙的击穿电压在 pd 值大时与阴极材料几乎无关。以上诸现象说明：当 pd 值较大

时，汤森理论是不完善的，从而促进了新的解释气体击穿学说的发展。1940 年 H. 雷特（H. Reather）、J. M. 米克（J. M. Meek）和 L. B. 廖勃（H. B. Leob）在观察云室中气体放电发展过程的基础上，分别独立地提出了解释气体间隙击穿的流注放电理论。

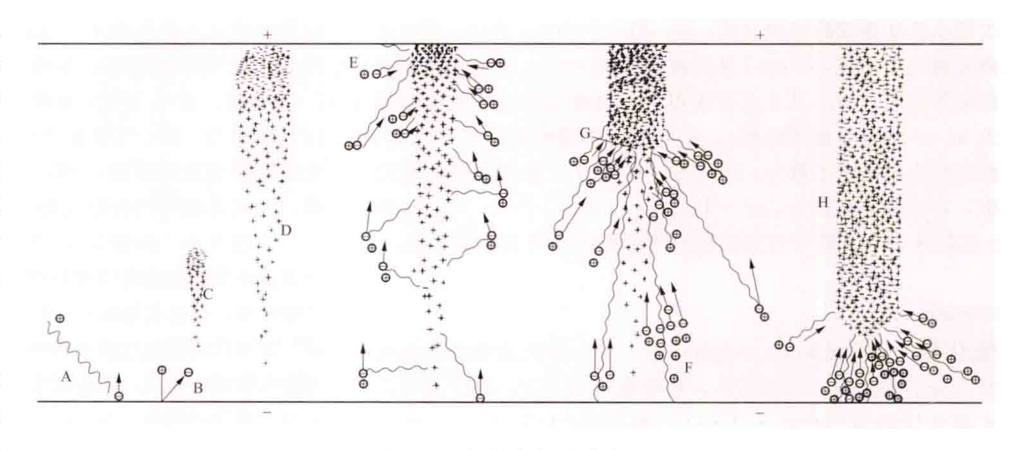


图 2　正流注的发展过程

㊀—电子；㊉—正离子；～～—光子；㊀㊉—光电离形成的电子—正离子对

流注放电理论的模型　H. 雷特、J. M. 米克等人在实验的基础上提出了如下的模型：间隙的放电先从电子崩开始；在电子崩发展和行进过程中，因为电子的迁移率比离子高得多，所以在电子崩的头部集中了负电荷，而在尾部为正电荷。如图 1 所示，电子崩所形成的空间电荷使间隙中的电场发生畸变；在电子崩的头部和尾部，由空间电荷的电场和外加电场叠加而得的复合电场要加强（图中箭头表示空间电荷产生的电场的方向）。当电子崩发展到一定的大小时，在电子崩的头部和尾部的复合电场达到很高的数值，使其附近的气体原子和分子发生电离和激励。同时，在此处正、负带电粒子的复合以及受激原子、分子的跃迁都会释放出光子。这些光子又使周围的气体分子、原子发生光电离，并产生新的电子。新产生的电子在强电场的作用下形成二次电子崩或称子崩。由初始及二次电子崩的大量正、负带电粒子组成电离度很高的通道区域，即流注。当流注贯穿整个间隙时，造成间隙的击穿。在流注放电理论中，光电离是重要的因素。因为光子飞行速度很快，所以流注发展也很快，由此可以解释间隙的击穿时间可以很小的原因。

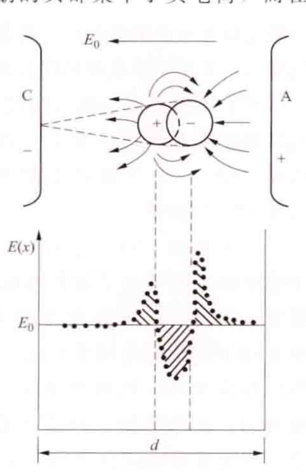


图 1　电子崩的空间电荷引起间隙中电场的畸变

A、C—阳极和阴极；d—间隙距离；E_0—无空间电荷时的电场；$E(x)$—空间电荷产生的电场与 E_0 相叠加而形成的复合电场

流注放电的发展过程　流注可分为正流注与负流注。

（1）正流注：从阳极方向朝阴极方向发展的流注。图 2 表示从电子崩发展成为流注的过程。A、B 分别表示在外光源照射或正离子撞击阴极而从阴极释放出的自由电子。这些电子在外电场的作用下，朝阳极运动并与周围的原子、分子发生碰撞电离，使电子倍增形成电子崩。C 和 D 是不同发展阶段的电子崩。在电子崩朝阳极行进过程中，因电子的迁移率大，电子崩头部集中电子，尾部集中正离子。由于扩散作用，使电子崩的头部呈球状，尾部为锥形。当电子崩走完整个间隙后，其头部的电子进入阳极，空间电荷形成很强的电场。此时由电子崩发射出的大量光子，将使周围气体发生光电离而产生电子-正离子对 E。新产生的电子在电场中加速又产生二次电子崩 F。它们和起始电子崩汇合，形成导电良好的等离子体通道 G——流注。不断向阴极发展的流注 H 最后贯通整个间隙，使间隙击穿。

从图 3 可以看到分枝流注发展的情况。在流注 I 的尾部同时形成两个电子崩 J 和 K。由于光电离，使两个电子崩发展成为分叉的两个流注。由此可见，流注理论可以解释放电通道具有较细的分枝的原因。

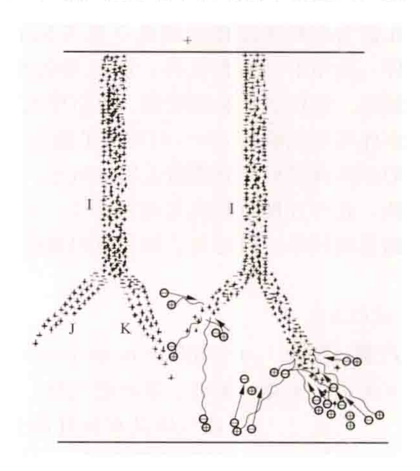


图 3　分枝流注

（2）负流注：从阴极方向朝阳极方向发展的流注。当外加电压较高时，初始的电子崩不用走完整个间隙距离，其头部的电场就已足够强，从而形成位于间隙中间的流注 L（见图 4），并向阴极发展。同时，由于流注 L 和阳极之间电场很强，发生电离和二次电子崩，二次电子崩汇入流注，又使流注向阳极发展。流注 L 朝两个方向发展后扩展为流注 M，同时在阳极处形成正流注 N 和在阴极处形成负流注 O。流注理论中关键的机制是间隙中发生的光电离过程。由此也可以解释间隙的击穿电压与阴极材料几乎无关。

图 4　负流注

电子崩转化为流注的条件　H. 雷特在实验观测的基础

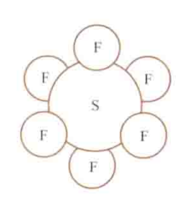
上得出流注形成的经验公式：$\alpha x_c=17.7+\ln x_c$，式中α为电子的碰撞电离系数，1/cm（见汤森放电理论）；x_c为电子崩发展的临界距离，cm。从上式可求得均匀电场中的自持放电条件为$\alpha d\approx 20$（d为极间距离），并可推出相应的间隙击穿电压。此时崩头中的电子数为：exp(20) $\approx 10^8$个。在汤森放电理论中，自持放电条件为：$\alpha d=\ln[1/(\gamma+1)]=8\sim10$，式中$\gamma$系数为一个正离子打到阴极时所释放的二次自由电子数。

liuhuage

硫化镉 （cadmium sulphide） 一种化合物半导体材料，分子式CdS。六角晶系，禁带宽度2.4eV，电子与空穴迁移率分别为$200cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$和$20cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$，掺入Cu、Ag等一价金属杂质在禁带中形成受主能级，掺入Al等三价金属杂质在禁带中形成施主能级。本征电导对可见光十分敏感，本征吸收长波限为513nm，掺杂可以提高光响应灵敏度。通常由向Cd的硫酸盐溶液中通入硫化氢沉淀来制取，为黄色粉末，熔点1750℃，不易生成单晶。用粉末硫化镉为原料通过烧结或真空蒸发制成多晶体可作光电导元件，除用于可见光区外，还可有效地用于短波，直至X射线区。其优点是灵敏度高、价格便宜。硫化镉与硫化锌的固溶体可制成波长490～675nm的激光器，与碲化镉混合制成的多晶薄膜可作异质结太阳能电池。虽然效率不高，但成本低，且可方便地制成大面积器件。与单晶半导体相比，硫化镉发现较早，但对其了解和应用都还有待进一步研究。

liufuhualiu

六氟化硫 （sulphur hexafluoride） 一种通常状态下无色、无臭、无毒、不燃的气体，分子式为SF_6。六氟化硫气体具有良好的化学稳定性、优良的绝缘和灭弧性能，可用作电气设备的绝缘介质和灭弧介质。



SF_6分子结构示意图

物理特性 SF_6分子中6个F原子围绕中心的S原子呈八面体排布（见图），由于S-F键合距离小、键合能高，使得SF_6的稳定性很高，在不太高的温度下接近惰性气体的稳定性。

常温常压下SF_6为气态，在20℃和0.1MPa时SF_6的密度约为空气密度的5倍。SF_6的部分物理特性见表。

SF_6的部分物理特性

物理性质	条件	单位	数值
相对分子质量			146.06
密　度	0.1MPa，20℃	kg/m^3	6.164
临界压力		MPa	3.68
临界温度		℃	45.5
三态点	0.22MPa	℃	−50.8
升华点		℃	−63.8
相对介电常数	0.1MPa，25℃	—	1.002049
介质损耗因数	0.1MPa	—	$<5\times10^{-6}$
电气强度	板-板（间距1cm）均匀电场，0.1MPa	kV/cm	89

SF_6是一种强电负性气体，它的分子极易吸附自由电子而形成质量大的负离子，这将削弱气体中的碰撞电离过程，因此其电气强度很高，在均匀电场中约为空气电气强度的2.5～3倍。在0.3MPa绝对压力下，其工频击穿强度和变压器油相当。SF_6气体在2000K时出现热分解高峰，因此在交流电弧电流过零时，SF_6对弧道的冷却作用比空气强得多，其灭弧能力约为空气的100倍。

工程应用 20世纪50年代末，SF_6开始用作高压断路器的灭弧介质。在超高压和特高压断路器中，SF_6作为灭弧介质已取代油，并已大量取代了压缩空气。从60年代中期起，SF_6被广泛用作高压电气设备的绝缘介质。SF_6气体绝缘变压器具有防火防爆的优点，作为配电变压器特别适用于人口稠密地区和高层建筑的供电，SF_6超高压变压器也已研制成功。SF_6气体绝缘金属封闭开关设备比常规的敞开式高压配电装置占地面积小得多，且其运行不受外界气象和环境条件的影响，因此不仅广泛用于超高压和特高压电力系统，而且已开始用于配电网络（SF_6气体绝缘的开关柜和环网供电单元）。SF_6气体绝缘输电管道具有电介质损耗小、传输容量大，且可用于高落差场合的优点，常用于水电站出线以取代常规的充油电缆。

SF_6气体还可与氮气组成SF_6-N_2混合气体，用作高寒地区断路器的灭弧介质，以防止高气压的纯SF_6在低温下液化。SF_6-N_2气体的常用混合比为1∶1，其电气强度约为纯SF_6气体的85%。

注意事项 SF_6气体的电子有效碰撞电离系数（即电子碰撞电离系数与电子附着系数的差值）随电场强度的增大而激增，使得SF_6气体在不均匀电场中的绝缘性能下降，即使是局部微小的电场畸变也会使SF_6的电气强度明显下降。所以在设计SF_6气体绝缘电气设备时应使电极间电场尽可能均匀；在电极加工时应注意其表面粗糙度不得超过规定值；在安装时则应注意防止安装错位引起电极表面缺陷以及避免导电微粒进入设备。气体绝缘金属封闭开关设备与输电管道都是在现场安装的，因此在投入运行前必须进行现场耐压试验，这一点是与常规电气设备不同的。

SF_6本身虽然无毒，但在电弧、火花或电晕放电的作用下会分解生成一些有毒的低氟化物，因此在气体绝缘的电气设备中必须安放吸附剂。常用的吸附剂有活性氧化铝和分子筛，吸附剂的量应不小于SF_6气体质量的10%。

SF_6气体的含水量过高会危及电气设备的安全运行，因为气体中水分对SF_6气体分解物的生成有影响，且水与酸性杂质在一起时会腐蚀材料和导致机械操作失灵。此外，水分在低温下会在固体绝缘表面凝露导致绝缘闪络事故。由于吸附剂（活性氧化铝、分子筛等）对SF_6中水分有吸附能力，因此对受潮的吸附剂应及时更换。

验收合格的SF_6新气钢瓶，直立存储在带顶棚、通风良好的库房中，严禁曝晒，严禁靠近易燃、油污地点，未经检验的气瓶不能同上述气瓶混放。存放半年以上使用时要复检其中湿度和空气含量，符合要求再用。

环境影响 SF_6具有很强的吸收红外辐射能力，温室效应明显。《联合国气候变化框架公约》中将SF_6等6种气体列为必须加以限制的温室效应气体，并明确规定了各发达国家对这6种气体排放量的削减指标。但电工领域中还没有能完全取代SF_6的气体，因此在使用SF_6气体的同时，必须重视相应环保问题，并积极采取措施和对策，如提高SF_6

的回收和再利用，强化监督维护、减少排放量，研发少用SF_6的设备，研究代用气体等。

lubang kongzhi

鲁棒控制 (robust control) 较好地保证控制系统的鲁棒性的新型控制。鲁棒性（robustness）是控制系统在其特性或参数发生摄动时，仍可使系统保持稳定或保持性能指标的属性。系统特性或参数的摄动常常是不可避免的。产生摄动的原因主要有两个方面，一个是由于量测的不精确使特性或参数的实际值会偏离它的设计值（标称值），另一个是系统运行过程中受环境因素的影响而引起特性或参数的缓慢漂移。稳定性的鲁棒性，称为鲁棒稳定性。

控制系统灵敏度分析 用来表征控制系统性能受参数变化（参数不确定性）的影响程度称为参数变化灵敏度，有轨迹灵敏度、性能指标灵敏度和特征值灵敏度。

参数不灵敏控制系统 设具有不确定参数的系统的状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}(\alpha)\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}(\alpha)\boldsymbol{u};\boldsymbol{x}(0) = \boldsymbol{x}_0 \tag{1}$$

式中$\boldsymbol{x}$为n维状态向量；$\boldsymbol{u}$为p维控制向量；$\boldsymbol{A}$为$n\times n$维系统矩阵；$\boldsymbol{B}$为$n\times p$维控制矩阵；α为不确定参数，标量。

增广系统设计法：其实质是将灵敏度向量$\boldsymbol{\sigma} = \partial \boldsymbol{x}/\partial\alpha$与状态向量$\boldsymbol{x}$一起组成增广状态向量$z$，对增广系统进行最优设计。灵敏度模型为

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial\alpha}x + \boldsymbol{A\sigma} + \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial\alpha}u + \boldsymbol{B}\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial\alpha} \tag{2}$$

联合式（1）和式（2），即得增广系统方程

$$\dot{\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{A}^*\boldsymbol{z} + \boldsymbol{B}^*\boldsymbol{u}^*;\boldsymbol{z}(0) = \boldsymbol{z}_0 \tag{3}$$

式中 $z = \begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\ \boldsymbol{\sigma}\end{bmatrix};\boldsymbol{A}^* = \begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & 0\\ \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial\alpha} & \boldsymbol{A}\end{bmatrix};\boldsymbol{z}(0) = \begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_0\\ \boldsymbol{\sigma}_0\end{bmatrix};$

$$\boldsymbol{B}^* = \begin{bmatrix}\boldsymbol{B} & 0\\ \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial\alpha} & \boldsymbol{B}\end{bmatrix};\boldsymbol{u}^* = \begin{bmatrix}\boldsymbol{u}\\ \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial\alpha}\end{bmatrix};\boldsymbol{\sigma}_0 = \boldsymbol{\sigma}(0)$$

设计性能指标取为

$$J = \frac{1}{2}\int_0^\infty(\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^*\boldsymbol{z} + \boldsymbol{u}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^*\boldsymbol{u}^*)\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中$\boldsymbol{Q}^*$为$2n\times 2n$维正半定加权阵；$\boldsymbol{R}^*$为$2p\times 2p$维正定加权阵。

对增广系统式（3），按线性最优控制器方法设计，可得控制规律

$$\boldsymbol{u}^* = \boldsymbol{K}^*\boldsymbol{z};\boldsymbol{K}^* = -(\boldsymbol{R}^*)^{-1}\boldsymbol{B}^*\boldsymbol{P}^* \tag{5}$$

式中$\boldsymbol{P}^*$为下述黎卡提方程的解

$$\boldsymbol{A}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^* + \boldsymbol{P}^*\boldsymbol{A}^* - \boldsymbol{P}^*\boldsymbol{B}^*(\boldsymbol{R}^*)^{-1}\boldsymbol{B}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^* + \boldsymbol{Q}^* = 0 \tag{6}$$

由于在反馈中引入灵敏度向量，因而能降低对参数的灵敏性。

此外，有二自由度结构法、确保性能指标设计法、最小灵敏度极点配置设计法、参数空间法，等等。

借H∞控制解决鲁棒稳定性问题 由于参数变化和未建模动态的存在，实际受控装置的动态特性是变化的，或者说，是不确定的。如果设计所依据的模型称为标称受控装置P，则特性的变化称为摄动。摄动模型有相加型摄动和相乘型摄动。鲁棒稳定性指没有或有摄动的情况下都稳定。

相加型摄动。设R是一个标量函数，若有摄动的$\boldsymbol{P}+\Delta\boldsymbol{P}$是严格真的实有理矩阵，和$\boldsymbol{P}$有相同数目的$\mathrm{Re}\, s\geqslant 0$极点，且满足如下限制

$$\|\Delta\boldsymbol{P}(\mathrm{j}\omega)\|_\infty < |R(\mathrm{j}\omega)|, 0\leqslant\omega\leqslant\infty \tag{7}$$

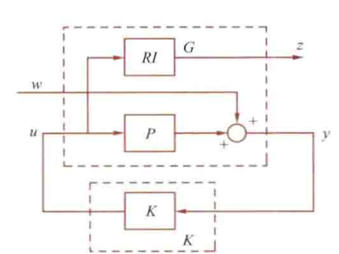
则可以证明：一个真的实有理控制矩阵$\boldsymbol{K}$能使所有$\boldsymbol{P}+\Delta\boldsymbol{P}$稳定的充分必要条件是使$\boldsymbol{P}$稳定，且满足

$$\|\boldsymbol{RK}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{PK})^{-1}\|_\infty \leqslant 1 \tag{8}$$

将广义受控装置$\boldsymbol{G}$定义为

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix}0 & R\boldsymbol{I}\\ \boldsymbol{I} & \boldsymbol{P}\end{bmatrix} \tag{9}$$

则鲁棒稳定性问题转化为如图所示的H_∞控制问题，即选择$\boldsymbol{K}$使$\boldsymbol{G}$稳定，且使从$\boldsymbol{w}$到z的传递函数阵$\boldsymbol{RK}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{PK})^{-1}$的$H_\infty$范数满足式（8）。



鲁棒稳定性问题 H_∞控制

参考书目

周克敏，等．鲁棒与最优控制．北京：国防工业出版社，2006.

Doyel，J. C，Francis，B A，Tannen A R. Feedback Control Theory. New York：Dover Publications，2009.

Luogefusiji xianquan

罗戈夫斯基线圈 (Rogowski coil) 见冲击大电流测量。

luojihanshu

逻辑函数 (logic function) 反映数字电路输入变量和输出变量之间逻辑关系的函数。逻辑代数（见布尔代数）是处理逻辑函数的有力工具。为了得到简化的数字电路，可对逻辑函数进行化简。

逻辑代数的基本公式与定律 三种基本运算，见表1。十个基本定律，见表2。

表1 逻辑代数的基本公式

逻辑与	逻辑或	逻辑非
$L=A\cdot B$	$L=A+B$	$L=\overline{A}$

在表2给出的十个基本定律中，定律形式a和b具有对偶的性质。它们遵守对偶原则：设F是一个逻辑函数表达式，如将F中所有的符号"+"换为"·"，将"·"换为

表2 逻辑代数的基本定律和法则

序号	名称	定律形式a	定律形式b
1	交换律	$A\cdot B=B\cdot A$	$A+B=B+A$
2	结合律	$A\cdot(B\cdot C)=(A\cdot B)\cdot C$	$A+(B+C)=(A+B)+C$
3	分配律	$A\cdot(B+C)=AB+AC$	$A+(B\cdot C)=(A+B)\cdot(A+C)$
4	同一律	$A\cdot 1=A$	$A+0=A$
5	零元素	$A\cdot 0=0$	$A+1=1$
6	互补律	$A\cdot\overline{A}=0$	$A+\overline{A}=1$
7	重叠律	$A\cdot A=A$	$A+A=A$
8	吸收律	$A+(A\cdot B)=A$	$A\cdot(A+B)=A$
9	否定律	$\overline{\overline{A}}=A$	
10	反演律（摩根定理）	$\overline{(A\cdot B\cdot C\cdots)}=\overline{A}+\overline{B}+\overline{C}+\cdots$	$\overline{(A+B+C\cdots)}=\overline{A}\cdot\overline{B}\cdot\overline{C}$

"+"，将 1 换为 0，将 0 换为 1，那么就得到一个新的表达式，叫作对偶式，记作 F'。即：

$$F=A\cdot(B+C),\text{则 } F'=A+(B\cdot C)$$

逻辑函数的表示方法　有真值表、函数表达式、逻辑图、卡诺图四种。

（1）真值表：以表格的形式表示逻辑函数各变量取值的组合和函数值的关系。

（2）函数表达式：通过与、或、非运算把各个变量联系起来，表示逻辑函数。

（3）逻辑图：一种比较接近工程实际的表示逻辑函数的方法，由各种逻辑符号及连线组成的逻辑电路图。

（4）卡诺图：逻辑函数的最小项方块图表示法。它用几何位置上的相邻，形象地表示组成逻辑函数的各个最小项之间在逻辑上的相邻性。

这四种逻辑函数的表示方法在本质上是相通的，可以互相转换。

逻辑函数的化简　通常有公式化简法和图形化简法两种方法。

（1）公式化简法：利用逻辑代数的公式和定律，经过运算，对函数的逻辑表达式进行化简，以求得最简的表达式。

（2）图形化简法：利用逻辑函数的卡诺图进行化简。这种方法的优点是简单直观，容易掌握，但在逻辑变量多于 5 个以后，就不存在简单、直观的优点，从而失去了实用意义。

lü

铝　（aluminium）　金属元素，化学符号 Al，原子序数 13。20℃时，铝的电阻率为 $2.5\times10^{-8}\Omega\cdot m$，除贵金属银和金外，导电性仅次于铜。铝的蕴藏量极丰富，价格低，密度不到铜的 1/3（20℃时，铝的密度为 $2.70g/cm^3$，铜的密度为 $8.89g/cm^3$），铝导线和铜导线电阻相同时，铝线直径是铜线的 1.3 倍，而重量约为铜线的 1/2。铝的加工性能比铜差，特别是耐蠕变性能差，不宜拉制细丝。铝遇空气中的氧极易氧化生成 Al_2O_3，故焊接性能差，也使其应用受限制。但延展性好，可制铝箔，应用很广，如制作电容器极板等。

由于铜资源贫乏，在大量用铜的电线电缆行业中，各种大电流传输线有以铝代铜的趋势。但铝的抗张强度差，为弥补这一缺点，常采用铝包钢，即钢芯铝绞线。由于趋肤效应，钢芯对导电性影响很小，却增加了抗张强度。此外，采用适当的热处理也能改善铝的机械性能。

铝的导电性也和杂质密切相关，含有铬、锂、锰、钒等杂质时，电阻率迅速增加。当含有铜、硅、锰、镁、铁等杂质时，导电性较差而硬度较高，称硬铝。

铝表面的氧化膜通常可起到防腐蚀的作用，但如接触酸、碱、盐及腐蚀性气体，将导致强烈的腐蚀。

稀土铝在架空线上应用极广。

lübo

滤波　（filtering）　见卡尔曼滤波。



Maikesiwei fangchengzu

麦克斯韦方程组 (Maxwell's equations) 描述电磁场中场量与自由电荷密度、电流密度之间关系的偏微分方程组。它是由 J.C. 麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879)(图为麦克斯韦的画像)在 1864 年提出的。在静止介质中，此方程组可表示为

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_C + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \quad (4)$$

式中 $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；$\boldsymbol{B}$ 为磁通密度；$\boldsymbol{D}$ 为电通密度；$\boldsymbol{J}_C$ 为传导电流密度；ρ 为自由电荷密度；t 为时间。这里采用国际单位制 (SI)。$\partial \boldsymbol{D}/\partial t$ 为位移电流密度，它是由麦克斯韦根据法拉第关于时变电场产生磁场的设想提出的。传导电流与位移电流的总和为全电流。式 (1) 称全电流定律，它示出全电流与磁场的关系，并说明位移电流和传导电流一样伴随有磁场。式 (2) 称法拉第感应定律，它说明磁场随时间变化时伴随有电场。式 (3) 表示磁通连续性原理。式 (4) 为用电通密度表示的高斯通量定理。式 (1) 及式 (4) 隐含着电荷守恒定律。



麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879)

此外，表示线性介质特性关系的本构方程组为

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{J}_C = \gamma \boldsymbol{E} \quad (7)$$

式中 ε、μ 和 γ 分别为介质的电容率、磁导率和电导率。式 (7) 为欧姆定律的微分形式，它不适用于超导材料。

麦克斯韦方程组与本构方程组构成了描述电磁场空间分布与时间变化规律的完整方程组。麦克斯韦根据这些规律得出了电磁波与光有同一属性的论断，两者以同样有限速度（光速）传播。1887～1888 年，这个预见为 H. R. 赫兹的实验所证实。

Maikesiwei-Wei'en dianqiao

麦克斯韦-维恩电桥 (Maxwell-Wien bridge)

见交流电桥。

maichong shunxu fenpeiqi

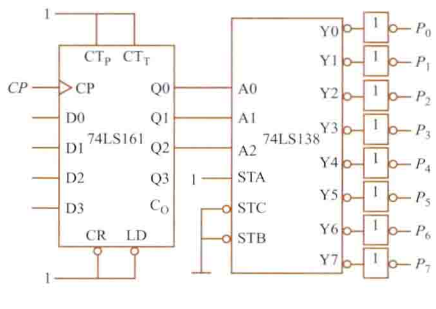
脉冲顺序分配器 (distributor of sequent pulses)

按时间先后顺序周期地产生系列脉冲的时序逻辑电路，又称顺序脉冲发生器或节拍脉冲发生器。它用于需要按规定顺序操作的场合，如工业生产流程线、注塑机、纺织机、数控机床等场合作顺序动作控制信号。

脉冲顺序分配器的结构有两大类型：一类是计数器型；一类是移位寄存器型。

计数器型脉冲顺序分配器 由计数器和译码器组成的脉冲发生电路。利用计数器来设计 N 路脉冲顺序分配电路，可选用 N 进制计数器，把计数器的输出接到译码器的地址输入端，即可在译码器的输出端获得所需要的脉冲信号。图 1 是由 8 进制计数器和译码器构成的 8 个顺序脉冲发生电路和输出波形。

移位寄存器型脉冲顺序分配器 由移位寄存器构成的脉冲发生电路。图 2 为一种移位寄存器型脉冲顺序分配器，图 2 (a) 是将移位寄存器 74LS194 的最高位输出 Q_3 取非后再反馈到串行数据输入 D_{SR}，构成 4 位扭环形寄存器。如果它的初态是 0000，则在时钟脉冲作用下，寄存器中的状态依次变为 1000、1100、…，然后又回到 0000。状态转换图如图 2 (c)所示，其余 8 个是无效循环，如图 2 (d) 所示，它的 8 个有效循环的工作波形如图 2 (b) 所示。



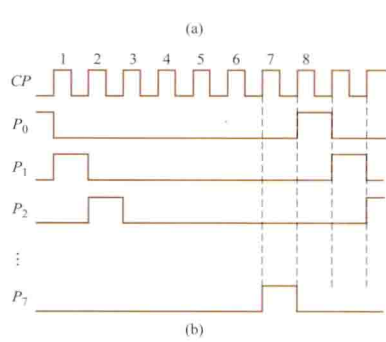


图 1 计数器型脉冲顺序分配器

(a) 电路图；(b) 输出脉冲波形

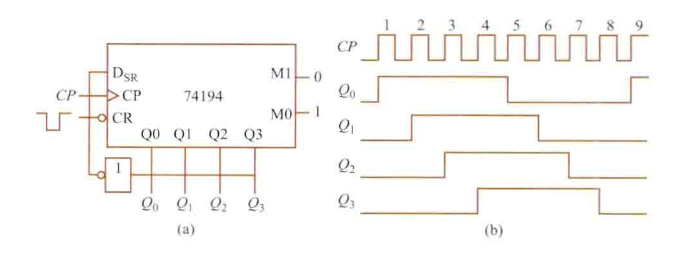


图 2 4 位扭环形计数器构成脉冲顺序分配器（一）

(a) 逻辑电路图；(b) 工作波形图

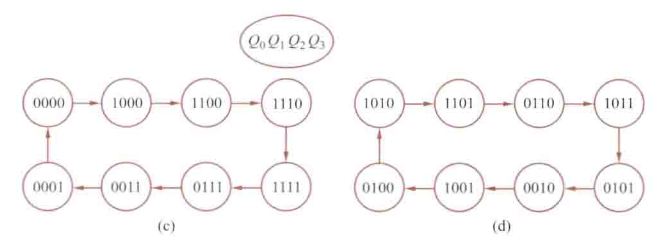


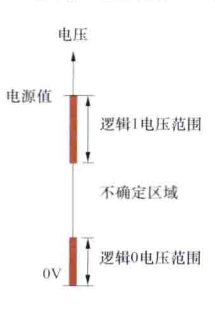
图2　4位扭环形计数器构成脉冲顺序分配器（二）
(c) 有效循环；(d) 无效循环

mendianlu

门电路　(gate circuits)　构成数字电路的基本单元。每一种门电路的输入与输出之间，都有一定的逻辑关系。这里逻辑是指“条件”与“结果”的关系。利用电路的输入信号反映“条件”，而用电路的输出反映“结果”，从而使电路的输出、输入之间代表了一定的逻辑关系。最基本的逻辑关系可以归结为与、或、非三种。其他复杂逻辑关系都可由这三种基本逻辑关系组合而成，因此可以利用基本门电路（见与门、或门和非门）组成具有各种逻辑功能的数字电路。除基本门电路之外，常用的门电路还有与非、或非、与或非等门电路。所有门电路都有系列化集成电路产品供选用。

在逻辑电路中，存在着两种相互对立的逻辑状态，例如电位的“高”与“低”，脉冲的“有”与“无”，开关的“合”与“开”，事物的“真”与“假”等。通常用符号0和1表示两种对立的逻辑状态，称为逻辑0和逻辑1。这样就可选用各种仅具有两种状态的元件来组成各种逻辑功能的电路，如继电器、开关、二极管和三极管等。

在数字逻辑电路中，理想的逻辑1定义为器件的电源电压，逻辑0定义为0V。在实际应用中，由于温度变化、电源电压波动、干扰及元件特性变化等因素的影响，不能如此精确地定义逻辑0和逻辑1，而是定义两个电压范围分别表示逻辑0和逻辑1，如图所示。若规定高电平表示逻辑1，低电平表示逻辑0，则为正逻辑体制；反之，若规定高电平表示逻辑0，低电平表示逻辑1，则为负逻辑体制。若无特别说明，一般采用正逻辑。



逻辑0和1的表示

对于同一电路，可以用正逻辑体制，也可以用负逻辑体制。根据所选用正负逻辑体制的不同，即使同一电路也具有不同的逻辑功能。

mianxiang duixiang de chengxu sheji

面向对象的程序设计　(object-oriented programming)

见程序设计方法。

mianxiang duixiang jishu

面向对象技术　(object-oriented technology)　从现实世界客观存在的事物出发，模拟人类思维方式来描述、构造软件系统的技术。认为客观世界中的不同系统是由事物及其之间的关系构成，这些事物都是对象，对象是构成世界的基本单位。面向对象的软件系统用统一建模语言UML语言来描述，用面向对象的程序设计语言来实现。

面向对象的基本概念　包括对象、类、继承、消息、多态、封装和信息隐蔽。①对象：人们要研究的领域范围内的事物，具有静态特征和动态特征，静态特征称为属性，动态特征称为方法或操作。②类：具有相同属性和方法的对象归为一类，类是对象的抽象描述，对象是类的实例。③继承：一个类可以定义在一个现有类的基础上，用于类间关系的建立、实现代码复用、方便系统的扩展。现实事物具有共性，也具有个性，对具有共性的若干类，抽象出父类，再根据事物的个性，定义出子类，子类可继承父类中的属性和方法，也可以定义自己独有属性和方法。继承根据父类的个数是否超过2个分为单继承和多继承。④消息：对象之间的信息传递称为消息。对象可以向其他对象请求服务调用，也可以响应其他对象的消息。⑤多态：一个相同的函数名可定义多个不同的函数实现，通过同一消息（函数）的调用，多个不同类的对象，做出不同的响应。⑥封装与信息隐蔽：通过设置类中属性和方法的不同访问权限，限制对属性和方法的访问，尽可能隐蔽类的内部细节，对外形成一个边界，外界只能通过有限的接口对对象进行操作。

统一建模语言（unified modeling language，UML）　一种图形化建模语言，在1997年被对象管理组织（object management group，OMG）采纳为面向对象的标准建模语言，作为软件组织、用户和开发者间的沟通工具，用于为软件系统建立描述模型。

mianxiang fuwu de jiagou

面向服务的架构　(service oriented architecture，SOA)

将用户的IT资源整合成可操作的、基于标准的服务，使其能被重新组合和应用的组件模型。其核心概念是重用和互操作，通过在服务之间定义良好的接口和契约，使得构建在各类系统中的服务以一种统一和通用的方式进行交互。SOA采用了通用的服务接口和XML标准，使得服务能够独立于硬件平台、操作系统和编程语言，可以用一个服务替换另一个服务而无须关心其底层的实现技术。

SOA中的服务并非仅指Web服务（Web service），Web服务只是服务中最为典型和常用的一种，其他很多的构件封装形式也可以称为服务。一个构件向外界暴露接口以供访问，该构件就称为一个服务。构件的种类很多，有EJB、JMS、JavaBean、COM/DCOM、CORBA等。由此可见，SOA并不是具体的某一种技术，而是通过服务来综合各种技术，在网络中实现系统的松散耦合。因此，SOA重点要解决的问题就是实现软件系统之间的集成。

单位用户亟需其业务信息系统能够灵活地适应业务流程的改变，这就是对SOA需求的主要动力源泉。SOA这种粗粒度、松耦合的服务架构，其服务之间通过简单、精确定义的接口进行通信，不涉及底层编程接口和通信模型，可以看作是B/S模型、XML/Web Service技术之后的自然延伸。它在充分利用现有IT资源，包括遗留应用和数据库资源时，新系统可以通过将遗留应用和数据纳入SOA，而不是替换

它们，与传统的紧耦合IT架构相比，这种松耦合架构最终将使单位的IT架构能够更快速、更有效地适应业务需求的变化。

实施SOA的主旨在于实现单位用户IT资产的最大化重用，其基本特征是：随时可用、粗粒度的服务接口、松散耦合、可重用的服务、支持各种消息模式等。实现SOA可以带来大量好处，允许分散于各地且采用不同技术的资源协同工作，能够按需动态构建应用程序，代码重用率更高，单位业务流程更容易标准化和集中控制等。

miaoshuhanshufa

描述函数法 (describing function method) 应用描述函数表述非线性环节以分析研究非线性系统的方法。非线性元件输出的基波分量与正弦输入之比称为描述函数，其值一般是复数。

若在非线性元件的输入端输入正弦函数，则在其输出端得到的一般不是正弦函数，除了基波分量外，还包含有高次谐波。在大多数实际的非线性元件的输出中，基波分量是主要的，高次谐波的振幅通常比基波分量的小得多，系统的非线性程度并不高。而且，大多数控制系统是低通滤波器，高次谐波衰减较多，因而，可以应用描述函数法。

原理 设非线性元件的输入为 $x(t)=A\sin\omega t=A\sin\theta$，这里 A 为振幅，ω 为频率，θ 为相角。非线性元件的输出为 $y=f(x)$，输出 y 可以展开成下列傅里叶级数

$$y=a_0+(a_1\sin\theta+\alpha_1\cos\theta)+(a_2\sin2\theta+\alpha_2\cos2\theta)+\cdots$$

式中 a_0 为直流分量；$a_1, \alpha_1, a_2, \alpha_2, \cdots$ 为傅里叶系数。对于一般的非线性元件，$a_0=0$。只考虑基波分量，即只计算

$$y_1=a_1\sin\theta+\alpha_1\cos\theta=Y_1\sin(\theta+\varphi)$$

此时输出的基波分量为 $y_1=a_1\sin\theta+\alpha_1\cos\theta=Y_1\sin(\theta+\varphi)$，式中 $Y_1=\sqrt{a_1^2+\alpha_1^2}$，$\varphi=\arctan(\alpha_1/a_1)$。

一般将描述函数记作 $Ne(A,\mathrm{j}\omega)$，以表明它与输入量的幅值和频率的依赖关系。当只与幅值有关而与频率无关时，则可用 $Ne(A)$ 表示。

根据上面所作的分析推导，有

$$Ne(A)=\frac{Y_1}{A}\angle\varphi$$

$$=\frac{\sqrt{a_1^2+\alpha_1^2}}{A}\angle\arctan(\alpha_1/a_1)$$

或

$$Ne(A)=g(A)+\mathrm{j}b(A)$$

式中 $g(A)=a_1/A$，$b(A)=\alpha_1/A$。在许多情况下，$b(A)=0$。

例如非线性元件为理想继电器，图1(a)示其输入—输出特性，图1(b)示其对于正弦输入的响应 $f(x)=f(A\sin\theta)=\begin{cases}E, 0<\theta<\pi\\ -E, \pi<\theta<2\pi\end{cases}$，其描述函数为 $Ne(A)=g(A)=\frac{1}{\pi A}\int_0^{\pi}E\sin\theta\mathrm{d}\theta-\frac{1}{\pi A}\int_{\pi}^{2\pi}E\sin\theta\mathrm{d}\theta=\frac{2E}{\pi A}\int_0^{\pi}\sin\theta\mathrm{d}\theta=\frac{4E}{\pi A}$，$b(A)=0$。

在论述非线性系统的控制理论著作中，往往列出了常用的具有分段线性性质的非线性元件的特性及其描述函数。

应用 描述函数在分析研究非线性控制系统中的应用，可举例说明如下：设非线性系统的框图如图2(a)所示，图中 N 为非线性元件，$G(s)$ 为线性部分的传递函数。闭环系统的特征方程式是 $1+G(\mathrm{j}\omega)\times Ne(A)=0$，即

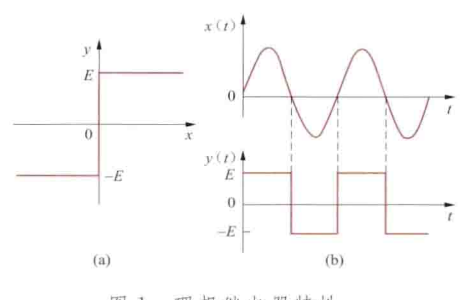


图1 理想继电器特性

(a) 输入-输出特性；(b) 对于正弦输入的响应

$$G(\mathrm{j}\omega)=-\frac{1}{Ne(A)} \tag{1}$$

式中 $G(\mathrm{j}\omega)$ 为线性部分的频率特性；$Ne(A)$ 为非线性元件的描述函数。这里，假设 Ne 只依赖于 A，且 G 是开环稳定的，这是通常遇到的情况。

可以分别画出 $G(\mathrm{j}\omega)$ 和 $-1/Ne(A)$ 的极坐标图以分析式(1)。先设 $Ne(A)=1$，则式(1)将变为 $G(\mathrm{j}\omega)=-1$，系统成为一线性系统。由奈奎斯特稳定判据知，对于上述线性系统，在系统开环稳定的情况下，如果 $G(\mathrm{j}\omega)$ 轨迹包围复平面上点 $(-1, \mathrm{j}0)$，则系统是不稳定的；如果不包围，则系统是稳定的（见奈奎斯特稳定判据）。为了判别非线性系统是否稳定，根据式(1)应以 $-1/Ne(A)$ 来代替线性系统的 $(-1, \mathrm{j}0)$。因此，对于非线性系统有：若 $G(\mathrm{j}\omega)$ 轨迹不包围 $-1/Ne(A)$，则系统是稳定的；若 $G(\mathrm{j}\omega)$ 轨迹包围 $-1/Ne(A)$，则系统是不稳定的；若 $G(\mathrm{j}\omega)$ 和 $-1/Ne(A)$ 有交点，则系统的输出可能为持续振荡。最后一种情况如图2(b)所示，还要作进一步的分析如下。

图2(b)上 $G(\mathrm{j}\omega)$ 与 $-1/Ne(A)$ 有两个交点 P 和 Q。根据 $G(\mathrm{j}\omega)$ 可确定交点处的振荡频率 ω，根据 $-1/Ne(A)$ 可确定交点处的振幅 A，自激振荡的频率和振幅是固定的，它在相平面中的轨迹是孤立的环，这就是极限环。对于现在所讨论的问题，P 点对应于不稳定极限环，Q 点对应于稳定极限环。

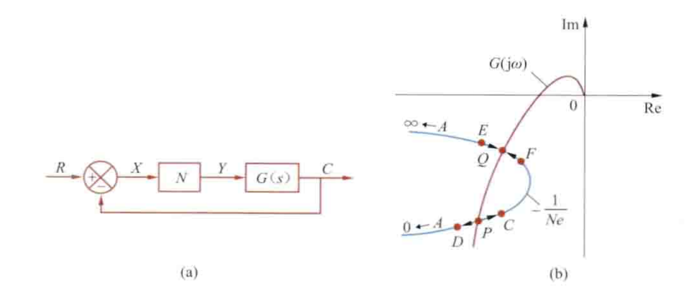


图2 非线性控制系统稳定性分析

(a) 系统框图；(b) 稳定性分析

设系统原在点 P 工作，振荡的频率为 ω_p，振幅为 A_p。若施加小干扰，使工作点从点 P 移到点 C，则根据奈奎斯特稳定判据，点 C 被 $G(\mathrm{j}\omega)$ 包围，对应于不稳定情况，振幅将继续增加，一直到点 Q 为止。若施加小干扰，使工作点从点 P 移到点 D，则可类似地判明振幅将继续减小直至零。

因此，工作点一经离开点 P 就不能再回去，点 P 是不能稳定工作的。

同理，可判明 Q 点能够稳定工作。

mohu kongzhi

模糊控制 (fuzzy control) 以模糊集合论、模糊语言变量描述和模糊逻辑推理为基础的新型控制。其特点为：①无需知道被控对象的数学模型；②易于对不确定性和非线性系统进行控制；③对系统参数变化有较强的鲁棒性；④有较强的抑制干扰能力。有一种意见认为：模糊控制是智能控制的一种类型。

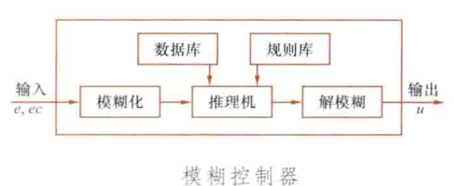
模糊性与模糊集合论 由于事物类属划分的不分明而引起的判断上的不确定性，是事物的模糊性 (fuzziness)。例如，健康人与不健康人之间没有明确的划分界限，当判断某人是否属于"健康人"的时候，就可能没有确定的答案。模糊性是与随机性不同的另一种不确定性。对于模糊性，排中（非此即彼）律不适用。模糊性的研究要运用模糊数学。

1965 年，L. A. 扎德 (L. A. Zadeh) 提出了模糊集合论，开创了模糊系统与模糊控制理论的研究。模糊集合论扩展了经典集合的概念。对于论域 $X=\{x\}$ 上的一个模糊子集 $\underset{\sim}{A}$，不能简单地指明哪些元素属于它、哪些元素不属于它。映射 $\mu_{\underset{\sim}{A}}:X\to[0,1]$；$x\to\mu_{\underset{\sim}{A}(x)}$ 确定 X 上的一个模糊子集 $\underset{\sim}{A}$。以 $\mu_{\underset{\sim}{A}(x)}$ 表示 x 对 $\underset{\sim}{A}$ 的隶属度，$\mu_{\underset{\sim}{A}}$ 称为 $\underset{\sim}{A}$ 的隶属函数。数 $\mu_{\underset{\sim}{A}(x_0)}$ 为 x_0 对 $\underset{\sim}{A}$ 的隶属度。隶属度是模糊数学所要量化处理的对象。隶属度把取值范围从集合 $\{0,1\}$ 扩大到在 $[0,1]$ 区间连续取值，表示处于中介过渡的事物对于区间两端所具有的倾向性程度，从亦此亦彼的现象中提取了非此即彼的信息。

模糊语言变量 一个语言变量可定义为一个五元体：$\{X, T(x), U, G, M\}$。式中，X 为语言变量名称；$T(x)$ 为语言值的总汇；U 为论域；G 为语法规则；M 为语义规则。例如，描述输入变量及输出变量语言值的模糊子集为：{负大，负中，负小，0，正小，正中，正大} 或写成 $\{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$，误差大小量化为 7 个等级 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$。

模糊逻辑与模糊推理 模糊逻辑将数理逻辑的连接词的使用和真值表的取值做了相应的推广，是研究模糊命题演算和模糊推理的一种非布尔逻辑。模糊推理则是从不精确的前提集合中得出可能的不精确结论的推理，又称近似推理。

模糊控制系统 采用模糊控制方法和计算机控制技术构成的一种具有反馈通道闭环结构的数字控制系统。它由如图所示的模糊控制器与模/数、数/模接口、执行机构、测量装置和被控对象组成。



模糊控制器

模糊控制器是一种语言型控制装置，由图示的五个部分组成。模糊化是将输入的确定量转化为可用于模糊推理的模糊矢量。系统输入、输出的模糊语言描述：若取误差 e、误差变化 ec 和输出 U 的论域均为 $-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$，相应的模糊子集分别为 $\underset{\sim}{A}_i$ ($i=1, 2, \cdots, 7$)、$\underset{\sim}{B}_j$ ($j=1, 2, \cdots, 5$) 和 $\underset{\sim}{C}_k$ ($k=1, 2, \cdots, 7$)。语言值相应分别为 $\{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$ 和 $\{NB, NS, 0, PS, PB\}$，则都可以由隶属函数表示。数据库存储所有输入、输出变量的模糊子集隶属度矢量值，规则库存储基于专家知识或熟练操作人员经验的模糊规则。若取"如果 e 是 $\underset{\sim}{A}_i$ 与 ec 是 $\underset{\sim}{B}_j$ 则 u 是 $\underset{\sim}{C}_k$"的规则形式，即共有 $i\times j$ 条规则，并按结论相同归并为 l 条。推理机按模糊规则进行模糊推理，获得模糊控制量。解模糊将模糊推理得到的模糊量清晰化为确定的控制输出。

模糊复合控制 以模糊控制为主，并与传统控制或其他新型控制技术相结合的控制。如模糊 PID 控制、模糊变结构控制、模糊预测控制、模糊适应控制、模糊神经网络控制和模糊专家系统等。

moni chengfaqi

模拟乘法器 (analog multiplier) 实现两个模拟电压瞬时值相乘的集成电路，又称模拟相乘器。实现 $z=xy$ 的运算，有多种方案，主要有两种：一是由对数放大器、加法电路和反对数放大器组成对数反对数式模拟乘法器；二是采用变跨导式模拟乘法器。模拟乘法器除应用于两数相乘外，还用于调制、鉴相等电路中。

对数反对数式模拟乘法器 将 $z=xy$ 式两边先取对数，再取反对数得 $z=\ln^{-1}(\ln x+\ln y)$，由此可画出乘法器方框图，如图 1 所示。k 为乘法器的增益系数。



图 1 对数反对数式模拟乘法器方框图

变跨导式模拟乘法器 电路如图 2 (a) 所示。在理想情况下，差分对管 V1、V2 可看作是参数完全相同的两个管子，因此可写出

$$i_y = i_{EE} = i_{E1} + i_{E2} = I_s e^{\frac{u_{BE1}}{U_T}} + I_s e^{\frac{u_{BE2}}{U_T}} \tag{1}$$

$$u_x = u_{BE1} - u_{BE2} \tag{2}$$

联解式 (1)、式 (2) 得

$$i_{E1} = \frac{i_{EE}}{1+e^{-\frac{u_x}{U_T}}} = x i_{EE} \tag{3}$$

式中 $x=\dfrac{1}{1+e^{-\frac{u_x}{U_T}}}$，称为对管 V1 和 V2 的电流分配系数。

同理

$$i_{E2} = \frac{i_{EE}}{1+e^{\frac{u_x}{U_T}}} = (1-x)i_{EE} \tag{4}$$

可见：差分对管 V1 和 V2 可看成是一个压控分流器，如图 2 (b) 所示。由于 $i_{C1}\approx i_{E1}$，$i_{C2}\approx i_{E2}$，所以

$$\begin{aligned} i_{C1}-i_{C2} &\approx i_{E1}-i_{E2} \\ &= i_{EE}\left[\frac{1}{1+\exp(-u_x/U_T)} - \frac{1}{1+\exp(u_x/U_T)}\right] \\ &= i_{EE}\,\mathrm{th}\frac{u_x}{2U_T} \end{aligned} \tag{5}$$

当 $u_x \ll 2U_T$ 时，则

$$i_{C1}-i_{C2}\approx i_{EE}\frac{u_x}{2U_T} \tag{6}$$

当 $u_y \gg U_{BE3}$ 时，则 $i_{EE}\approx u_y/R_e$，代入式（6）得

$$i_{C1}-i_{C2}=\frac{1}{2R_eU_T}u_xu_y$$

模拟乘法器的输出电压 u_o 为

$$u_o=R_c(i_{C1}-i_{C2})=\frac{R_c}{2R_eU_T}u_xu_y=Ku_xu_y \tag{7}$$

式中 $K=\frac{R_c}{2R_eU_T}$，称为乘法器的增益系数。由以上分析可得结论如下：

（1）当 $u_x \ll 2U_T$ 且 $u_y \gg U_{BE3}$ 时，可实现两模拟电压瞬时值相乘。但是，两个输入电压 u_x 和 u_y 的动态范围太小。

（2）因增益系数 K 包含 U_T，故与温度有关，将引起温漂。

（3）u_x 的极性可正可负；而 u_y 的极性只能上正下负，否则 V3 将截止。故图 2（a）电路又称两象限变跨导乘法器。

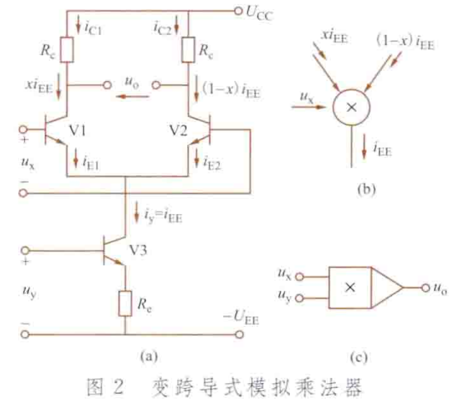


图 2　变跨导式模拟乘法器

（a）电路图；（b）压控分流器图形符号；（c）模拟乘法器图形符号

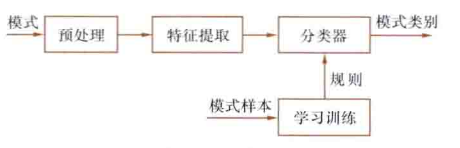
模拟乘法器的图形符号如图 2（c）所示。

moshi shibie

模式识别

（pattern recognition）　研究模式鉴别和分类方法的信息处理学科。模式包括客观存在的物体或事件，也可以包括主观上的心理状态或现象。由于处理过程离不开数字计算机，因此常称为计算机模式识别或数字模式识别。

模式识别一词原先属于认知科学中描述人们感知事物的一种过程。20 世纪 50 年代末，有人利用计算机技术进行感知机方面的研究。20 世纪 60 年代中，由于航天遥感技术的出现，大量的遥感图像信息的计算机自动处理促进了模式识别技术的发展，并在国防、科研、生物医学方面得到成功的应用。到 20 世纪 70 年代，模式识别已在理论上和技术上逐步发展成为独立完整的体系，成为计算机科学的前沿学科之一。模式识别的基本任务是用数学方法把未知模式归属到已知类别中去。一般方法如图所示。其中：预处理模块对输入的模式进行滤波、校正和特征增强；特征提取模块对模式进行信息压缩，抽取表征该类模式特点的特征信息；学习训练模块的功能是从输入的已知模式样本中归纳出分类规则；在分类规则指导下分类器对模式特征进行分类推理，从而确定模式的类别作为系统的输出。



模式识别过程

分类　按特征的表达方法，模式识别技术可分为判决理论法和结构法两大类。

（1）判决理论法。用一组数值来表达每个模式的特征值。不同的模式根据特征值的不同，在特征空间中将分布在不同的区域中。利用数学方法对该空间进行区域划分，就可获得分类规则。通常特征值可看成随机变量。特征空间的划分采用数理统计方法，这种方法称为统计模式识别。

（2）结构法。把待识目标按其构成分割成最小基本单元（称为元素），并用字符串来代替元素及元素间的关系。这种字符串的模式描述颇类似英语句子，因而可采用形式语言理论的研究方法。同类模式“句子”由于结构相同而可用同种文法表示，称为模式文法。这样，分类判别过程就变为用类别的模式文法对输入模式句子作文法分析的过程，这种方法又称为句法模式识别。在句法模式识别中，对文法进行开拓使之能表达二维或多维关系，于是就出现了树文法、图文法、丛文法等。

相关学科　①数字图像处理：利用计算机对数字化的图像进行加工的技术。②计算机视觉：用计算机分析视觉信息，从而达到描述、理解图像含义的学科。最典型的事例是从二维平面图像中解释出三维深度的信息。③人工神经网络：利用相对简单的计算单元按一定的方式相互连接成复杂的网络。通过样本训练来改进各单元的计算功能（参数），从而使整个网络输入/输出之间实现特定的计算功能。该网络类似于生物神经网络，工作过程近似于并行处理，并有学习功能。特别适合于感知识别方面的任务。

应用领域　①图像识别：从图像中发现和识别目标。图像也可包括非视觉信息，如红外线、超声波图像等。一些典型的应用有天气预报、卫星遥感图片的地质资源分析、作物收成估计、环境监护；军事上有目标侦察、飞行器制导；医学上的细胞识别、医学图像分析；工业上的产品质量检验、机器人视觉等。此外在刑侦方面有指纹分析、印章鉴别等应用。②语音文字识别：对输入文字、语音进行自动编码、存储（不包括对其理解）。目前对限制范围内的语音识别已达到较满意的结果。标准印刷字符（包括中、英文等多种文字）识别已有成功的方法。手写体汉字识别已进入实用阶段。③系统工程：模式识别是先通过学习训练建立模型，然后进行识别判决的工作过程。它提供了一种自适应、自学习系统的信息处理方法。这种方法已被用于人口预测、交通管理和工业过程控制等系统工程领域中。

moshu zhuanhuanqi

模数转换器

（analog to digital converter）　能将模拟量转换成数字量的器件。简称 ADC 或 A/D。模数转换器是数字电路和模拟电路的桥梁。因此，它在需要应用数字技术和计算机技术对模拟信息进行分析、处理和控制的各个领域中得到广泛应用。

分类及原理　ADC 的类型很多，原理各异。①按照有无中间参数可分为：直接转换型和间接转换型。间接型 ADC 一般又可以分为电压-频率变换型和电压-时间变换型两种，前者是把模拟输入信号先转换为成正比的频率信号，再将频率信号转换为成正比的数字信号；后者是先把模拟信号

转换为成正比的时间信号，再将时间信号转换为成正比数字信号。②按照转换速度由高到低可分为：并行比较型、逐次渐近型和双积分型等。

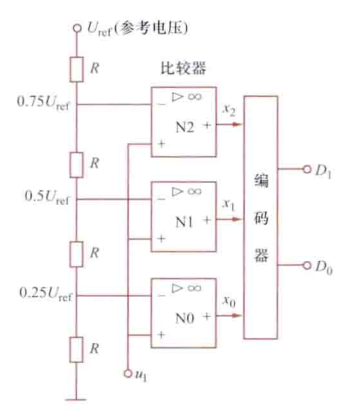


图 1　并行比较型模数转换器原理电路

并行比较型模数转换器　图 1 为两位并行比较模数转换器的原理电路。这种转换方式比较简单，类似于日常生活中用尺量布，量的是布，读的是尺数。该转换器一般由比较器、编码器和电阻网络组成。n 位数码需要用 2^n-1 个比较器，2^n 个电阻。输入模拟电压信号u_1同时送到各比较器N0～N2 的同相端，各比较器的基准参考电压由 U_{ref}经电阻网络分压供给，2^n 个电阻可分为 2^n-1 个不等的电压值，分别送到各比较器的反相端。当u_1在某量值区间时，则此量值以下的比较器输出为 1，其余的输出为 0，经编码器转换为二进制代码。图 1 中u_1与x_2、x_1、x_0和 D_1、D_0的关系如表所示，转化传输特性如图 2 所示。这种转换器的优点是电路简单，转换速度快，但当位数多时需要的电阻和比较器数增加，集成化工艺困难，故只适用于要求转换速度高、输出位数少的场合。

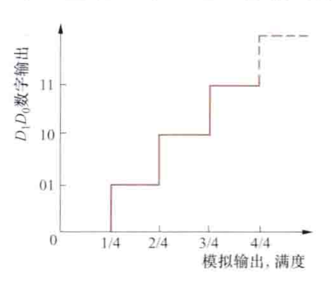


图 2　模数转换传输特性

模拟量与数字量的关系

模拟输入 u_1	比较器输出 x_2	x_1	x_0	数字输出 D_1	D_0
(0～0.25) U_{ref}	0	0	0	0	0
(0.25～0.5) U_{ref}	0	0	1	0	1
(0.5～0.75) U_{ref}	0	1	1	1	0
(0.75～1) U_{ref}	1	1	1	1	1

逐次渐近型模数转换器　这种方式类似于用天平称物，用 n 个砝码与物体逐次进行比较，一直达到平衡为止，砝码即为物体的质量。该转换器一般由比较器、逐位逼近寄存器和数模转换器组成。图 3 为其原理框图，比较器 N 对输入模拟电压u_1与经数模转换器 DAC 的输出电压 U_A 进行比较，数模转换器输出按时钟节拍从高位到低位逐次设定逼近，直至二者差别小于最低位量值，此时设定的数字量即等于模拟量 u_1，由 D_3、D_2、D_1、D_0输出。这种转换方式有较高的转换精度和速度，集成 ADC 产品多采用这种方式。

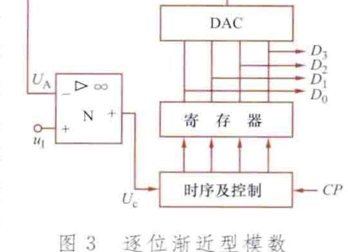


图 3　逐位渐近型模数转换器原理框图

双积分型模数转换器　这种方式属于间接型 ADC。该转换器一般由积分器、比较器、计数器、模拟开关 S、基准电压 U_{ref}、计数器、控制电路等构成。这种转换方式首先对u_1进行积分，将输入转换为一个成比例的时间量，积分能很好地抑制干扰。原理框图如图 4 所示。

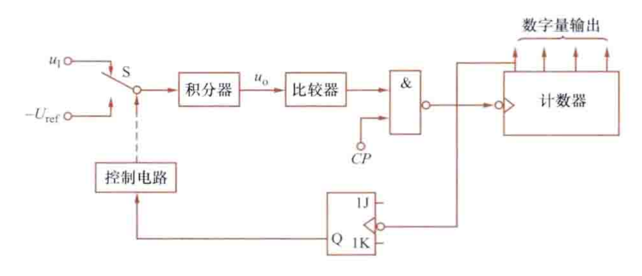


图 4　双积分型模数转换器原理框图

转换过程如下：转换前积分器中积分电容完全放电，计数器中各触发器均清零。模拟开关 S 接通输入电压u_1，积分器对u_1在固定时间 T_1 间隔内进行第一次积分（见图 5 波形）。在$u_O(t_1)\leqslant 0$，比较器输出为 1 时，与非门打开，计数脉冲 CP 通过与非门送入计数器。当计数溢出时（即t_1时刻），产生的溢出脉冲经 JK 触发器送到控制器，控制开关 S 接通与u_1极性相反的基准电压$-U_{ref}$，积分器对$-U_{ref}$进行第二次积分，u_O向着相反的方向积分并逐渐趋向零，过零时比较器翻转，输出由 1 变 0，与非门关闭，计数器停止计数。第二次积分时间 T_2（见图 5）正比于输入电压u_1。

T_2 是完成电压到时间转换的中间变量，在 T_2 时间内计数器的计数值是与输入电压u_1成正比的数字量。第一次积分u_1越大，$u_O(t_1)$ 也越大，第二次积分的时间 T_2 就长［见图 5 中u'_O（t_1）虚线波形］，计数脉冲就多，输出数字量就大。

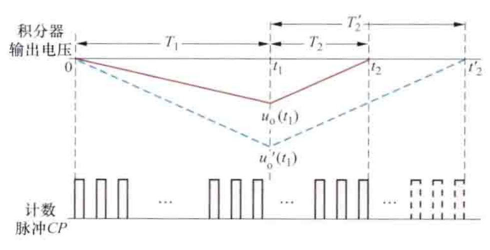


图 5　双积分式模数转换电压波形

这种双积分型模数转换器特点是有较强的抗干扰能力，转换精度高，但转换速度低，故常用于要求精度高、速度不高的场合。

技术指标　ADC 的主要指标有转换精度、转换时间和采样率。

（1）转换精度：由分辨率和转换误差来决定。①ADC 分辨率（resolution）是指 ADC 能够分辨输入信号的最小变化量，定义为单位量化电压与满量程电压的比值，n 位 ADC 的分辨率为 $1/(2^n-1)$。通常也用 ADC 数字信号的位数 n 来表示分辨率。②ADC 转换误差主要包括量化误差、偏移误差、增益误差等。其中量化误差是 ADC 本身固有的一种误差，由 ADC 的有限分辨率引起的误差。而其他几种误差是由于电路内部各元器件及单元电路偏差产生的。

（2）转换时间：从模拟信号输入起，到数字输出达到规定的精度所经过的时间。转换速率是转换时间倒数。积分型 ADC 的转换时间一般在几十毫秒到几百毫秒的范围内，属低速 ADC；逐次比较型 ADC 的转换时间大约在几百纳秒到

几十微秒的范围内，属中速 ADC；并行比较型 ADC 可达到纳秒级，属高速 ADC。

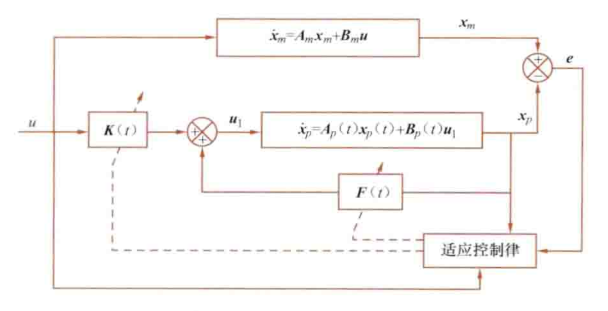
（3）ADC 采样率：采样时间的倒数，采样时间是指两次转换的间隔。为了保证 ADC 转换的正确完成，采样率必须小于或等于转换速率。因此，习惯上将转换速率在数值上等同于采样速率，常用单位是 Ksps（kilo samples per second）和 Msps（million samples per second），表示每秒采样千/百万次。这一指标是使用 ADC 必须注意的参数，受 ADC 转换时间限制。

发展 随着器件材料、电路结构、制作工艺等方面的改进和提高，ADC 的性能不断提高，比如，采用Σ—Δ 调制技术，使得在同样工艺下的单片 ADC 分辨率可达到 24 位；流水线式 ADC 使速度、分辨率和功耗等性能进行折中；采用数字校正和统计匹配技术，使分辨率得到进一步提高。ADC 芯片基本包含了采样保持电路、基准源、多路转换开关等功能模块。ADC 与微处理器的兼容性越来越好。由于 IC 设计和制造技术飞速发展，许多微处理器芯片中都嵌入了高性能的 ADC、DAC 等，构成了混合信号处理器，增强了微处理器芯片功能，减少了外围电路，应用更加方便。

moxing cankao shiying kongzhi xitong

模型参考适应控制系统

（model reference adaptive control system） 通过一定的适应控制律，对调节器的参数进行调整，使被控对象输出与优化的参考模型的输出之间的偏差逐步减小的适应控制系统。模型参考适应控制，最初由伟狄基（Whitaker）于 1958 年提出，并用参数最优化理论导出了适应控制律的算法。这一方法的最大缺点是不能确保所设计的适应系统是全局渐近稳定的。因此，1966 年 P. C. 派克（P. C. Parks）提出了用李雅普诺夫稳定性理论来设计模型参考自适应控制系统。这一设计方法的基本思想是选择合适的李雅普诺夫函数，以保证系统的全局稳定性，从而也求得了适应控制律。下面讨论用李雅普诺夫稳定性理论来求取模型参考适应控制律的设计方法。模型参考适应控制系统的结构，如图所示。



模型参考适应控制系统

其中被控对象是结构已知、参数未知的线性系统，它的状态方程式为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_p = \boldsymbol{A}_p(t)\boldsymbol{x}_p + \boldsymbol{B}_p(t)\boldsymbol{u}_1 \tag{1}$$

其中
$$\boldsymbol{u}_1 = \boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{u} + \boldsymbol{F}(t)\boldsymbol{x}_p \tag{2}$$

将式（2）代入式（1），得

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}_p &= \boldsymbol{A}_p(t)\boldsymbol{x}_p + \boldsymbol{B}_p(t)[\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{u} + \boldsymbol{F}(t)\boldsymbol{x}_p] \\ &= [\boldsymbol{A}_p(t) + \boldsymbol{B}_p(t)\boldsymbol{F}(t)]\boldsymbol{x}_p + \boldsymbol{B}_p(t)\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{u}\end{aligned} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{x}_p$、$\boldsymbol{u}$ 相应地为被控对象的 n 维状态向量和 p 维的输入向量；$\boldsymbol{A}_p(t)$ 为 $n\times n$ 维矩阵；$\boldsymbol{B}_p(t)$ 为 $n\times p$ 维矩阵。矩阵的元素 a_{pij} 和 b_{pij} 是受干扰影响的时变参数。通常被控对象的参数是不便于直接调整的，因此，为了补偿被控对象参数的变化，引进可调的前馈增益矩阵 $\boldsymbol{K}(t)$ 和反馈补偿矩阵 $\boldsymbol{F}(t)$。

给定一个参考模型，它对输入 $\boldsymbol{u}$ 的响应代表被控对象所期望的响应。设参考模型的状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_m = \boldsymbol{A}_m\boldsymbol{x}_m + \boldsymbol{B}_m\boldsymbol{u} \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{A}_m$ 为 $n\times n$ 维常数矩阵，$\boldsymbol{B}_m$ 为 $n\times p$ 维常数矩阵。

系统的广义状态误差向量为

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{x}_m - \boldsymbol{x}_p \tag{5}$$

由式（5）可得
$$\dot{\boldsymbol{e}} = \dot{\boldsymbol{x}}_m - \dot{\boldsymbol{x}}_p \tag{6}$$

将式（3）和式（4）代入式（6）中，得

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{e}} = \boldsymbol{A}_m\boldsymbol{e} &+ [\boldsymbol{A}_m - \boldsymbol{A}_p(t) - \boldsymbol{B}_p(t)\boldsymbol{F}(t)]\boldsymbol{x}_p \\ &+ [\boldsymbol{B}_m - \boldsymbol{B}_p(t)\boldsymbol{K}(t)]\boldsymbol{u}\end{aligned} \tag{7}$$

为了使被控对象对输入 $\boldsymbol{u}$ 的响应与参考模型对输入 $\boldsymbol{u}$ 的响应相一致，适应控制律对 $\boldsymbol{K}(t)$ 和 $\boldsymbol{F}(t)$ 进行调整，使被控对象与参考模型相匹配，即 $\boldsymbol{A}_m = \boldsymbol{A}_p(t) + \boldsymbol{B}_p(t)\boldsymbol{F}^*$，$\boldsymbol{B}_m = \boldsymbol{B}_p(t)\boldsymbol{K}^*$，则式（7）可改写为

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{e}} &= \boldsymbol{A}_m\boldsymbol{e} + \boldsymbol{B}_m(\boldsymbol{K}^*)^{-1}[\boldsymbol{F}^* - \boldsymbol{F}]\boldsymbol{x}_p \\ &\quad + \boldsymbol{B}_m(\boldsymbol{K}^*)^{-1}[\boldsymbol{K}^* - \boldsymbol{K}]\boldsymbol{u} \\ &= \boldsymbol{A}_m\boldsymbol{e} + \boldsymbol{B}_m(\boldsymbol{K}^*)^{-1}\tilde{\boldsymbol{F}}\boldsymbol{x}_p + \boldsymbol{B}_m(\boldsymbol{K}^*)^{-1}\tilde{\boldsymbol{K}}\boldsymbol{u}\end{aligned} \tag{8}$$

式中 $\tilde{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{F}^* - \boldsymbol{F}$ 为 $p\times n$ 维矩阵；$\tilde{\boldsymbol{K}} = \boldsymbol{K}^* - \boldsymbol{K}$ 为 $p\times p$ 维矩阵。

选择一个李雅普诺夫函数 $\boldsymbol{V}$，即

$$\boldsymbol{V} = \frac{1}{2}[\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{e} + tr(\tilde{\boldsymbol{F}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_1^{-1}\tilde{\boldsymbol{F}} + \tilde{\boldsymbol{K}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_2^{-1}\tilde{\boldsymbol{K}})] \tag{9}$$

其中 $\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{\Gamma}_1^{-1}$、$\boldsymbol{\Gamma}_2^{-1}$ 都是对称正定矩阵，故 $\boldsymbol{V}>0$。

由李雅普诺夫方法第二法，可得适应控制律为

$$\dot{\boldsymbol{F}} = \boldsymbol{\Gamma}_1[\boldsymbol{B}_m(\boldsymbol{K}^*)^{-1}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{e}\boldsymbol{x}_p^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

$$\dot{\boldsymbol{K}} = \boldsymbol{\Gamma}_2[\boldsymbol{B}_m(\boldsymbol{K}^*)^{-1}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{e}\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

这样确定的 $\dot{\boldsymbol{F}}$ 和 $\dot{\boldsymbol{K}}$ 参数调整的适应控制律，对任意分段连续的输入向量 $\boldsymbol{u}$，能保证模型参考适应系统是全局稳定的。

模型参考适应控制系统的设计方法，还有 V. M. 波波夫（V. M. Popov）提出的超稳定理论（见适应控制系统稳定理论）的设计方法。



NMOS jicheng luojimen

NMOS集成逻辑门 (NMOS integrated logic gate)

全部使用N沟道MOS管构成的集成逻辑门电路，又称NMOS集成门。NMOS集成逻辑门工作速度比PMOS集成逻辑门要快，它在数字电路中得到广泛应用。

nadianzi qijian

纳电子器件 (nanoelectronic devices) 器件特征尺寸在纳米尺度（0.1～100nm）内并利用量子效应的新型电子器件。纳电子器件的工作机理依赖于器件的量子效应，如隧道穿越效应、库仑阻塞效应、干涉效应等。纳电子器件具有尺寸小、功耗低和响应速度快等优点，可从根本上解决日益严重的微电子器件功耗问题。

发展 1981年发明了扫描隧道显微镜，可直接观察物质表面原子（数纳米大小）的排列状态，为研究特征尺寸在纳米级的器件和电路结构提供了新的技术。随后10年间出现了原子力显微镜、磁力显微镜和扫描近场光学显微镜，进一步促成了纳电子器件的发展。20世纪80年代后期，在金属和半导体微结构中相继观察到了库仑阻塞效应，单电子隧穿现象（颗粒状金属的电阻随温度下降反常增加）重新得到关注。随后Meirav等在4K温度下制造了完整的单电子器件。1991年，Iijima发现了直径为4～30nm的多壁碳纳米管。1993年，Lent等提出了纳米量子点构成元胞自动机的概念。1997年，Orlov等通过在氧化硅片上采用电子束平板印刷术工艺和阴影蒸发技术，在低于50mK温度下制造出第一个量子元胞自动机器件（量子点器件），该器件结构包括四个铝量子点，量子点之间通过铝—氧化铝—铝（Al－AlO_x－Al）隧穿结连接。1998年，Sander等利用碳纳米管材料作为沟道成功合成碳纳米管场效应管。21世纪以来，纳电子器件获得了更大的发展，出现了如分子晶体管、自旋器件和高k栅（高k：高介电常数绝缘介质）纳米CMOS等纳电子器件。此外，器件物理学家和集成电路工程师不断拓展纳电子器件的工作温度，建立非理想因素模型，以期获得纳电子器件的更广泛应用。

分类 按器件属性纳电子器件可分为CMOS纳米器件和非CMOS纳米器件两大类。

CMOS纳米器件 包括经典CMOS纳米器件和非经典CMOS纳米器件两种。经典CMOS纳米器件主要是Si CMOSFET，非经典CMOS纳米器件按栅结构的特点分为单栅、多栅和圆柱栅MOS纳米器件，如单栅金属氧化层半导体场效应管（MOSFET）有增强输运晶体管和超薄SOI (silicon－on－insulator) MOS晶体管，双栅MOSFET有约束双栅平面MOSFET、独立开关双栅（接地平面）MOSFET和垂直MOS晶体管等。

非CMOS纳米器件 主要包括电荷基型和非电荷基型或非场效应管（FET）型两种。电荷基型器件主要包括单电子器件（single electron device，SED）和共振隧穿器件（resonant tunneling device，RTD）等。非电荷基型器件包括量子点器件（quantum-dot device，QD）、纳磁体逻辑器件（nanomagnetic logic device，NMLD）、碳纳米管器件（carbon nanotube device，CNTD）、分子器件（molecular device，MD）和快速单磁通量子器件（rapid single flux quantum device，RSFQD）等。

常见纳电子器件 常见的非CMOS纳米器件有：共振隧穿器件（RTD）、单电子器件（SED）、量子点器件（QD）、纳磁体逻辑器件（NMLD）、碳纳米管器件（CNTD）、分子器件（MD）和快速单磁通量子器件（RSFQD）。

共振隧穿器件（RTD） 利用电子的共振隧穿机制进行工作的器件，主要有共振隧穿二极管和共振隧穿三极管两种。RTD的组成包括两个距离很近、能产生共振隧穿效应的双势垒层和中间的量子阱，工作时在双势垒的两端施加电压，在发射区的电子只有与隧穿势阱中的电子能级相同时，才有电子通过量子阱形成流过器件的电流，否则电子被双势垒反射。共振隧穿器件的能带图和伏安特性如图1所示。未加偏压时，基态能级E_0位于发射区能级E_F和集电区能级E_C以上，如图1（a）所示，故无隧穿发生。外加偏压时，能带向下倾斜，E_0下降到与E_F对准时共振隧穿开始，当偏置电压U增大时，E_0与E区（阴影部分）E_F以下、E_C以上某能量E对准时，如图1（b）所示，该能级E与E_0能级发生共振隧穿。共振隧穿除了与势垒高度有关外，还和势阱中的能量分布有关。当电子以不同的能量与隧穿势阱中的能级发生共振隧穿时，会分别形成多个峰值，如图1（c）所示，即出现负微分电阻的现象。

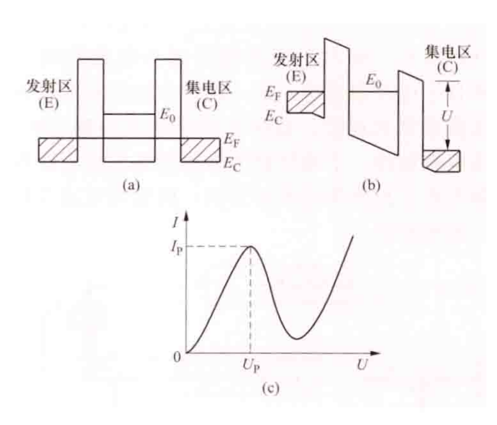


图1 双势垒量子阱共振隧穿器件
(a) 未加偏压时的能带图；(b) 加偏压时的能带图；(c) 负微分电阻伏安特性

单电子器件（SED） 三维尺寸都在电子波长数量级范围内，主要利用库仑阻塞原理，通过对一个或几个电子的精确控制完成特定功能的器件。库仑阻塞的原理可以用一个电子盒来表示，如图2所示。单电子器件的三维尺寸很小，岛和栅极之间的电容就很小，可达10^{-18}F，即便岛区内只有一个电子，也会产生几百毫伏的电压。这样，先进入岛区的电子会强烈排斥后来进入的电子，即产生库仑阻塞效应。

单电子晶体管（single electron transistor，SET）是SED的典型代表，它是一个三端器件，主要由一个电化学势可调

的库仑岛（或称为量子点）和分别与其弱耦合连接的两个隧道结构成，如图 3（a）所示，其中带横线的小方框表示隧道结符号，U_G 为栅压，C_G 为栅极与库仑岛之间的电容，C_D 和 C_S 分别为两个隧道结的电容，R_D 和 R_S 分别为两个隧道结的等效电阻。栅极上单个电子电荷的微小变化可以开启或关断漏源电流。因此，可以通过栅极电压（导致栅源电压发生变化）的大小来控制 SET 漏源电流的形成。当漏源电压不变时，漏源电流会随栅源电压的增大而产生库仑阻塞振荡特性，如图 3（b）所示，其中 I_{DS} 为漏源电流，U_{DS} 为漏源电压，U_{GS} 为栅源电压。当栅源电压不变时，漏源电流会随漏源电压的增大而产生库仑台阶特性。SET 具有尺寸小、功耗低、集成度高等优点以及库仑振荡特性，其灵敏度高、增益低，这与传统 MOSFET 具有低灵敏度、高驱动能力和高增益等特点形成很强的互补性，由它们构成的 SET-MOS 混合结构可以结合两者的优点，且具有周期性的负微分电阻特性。

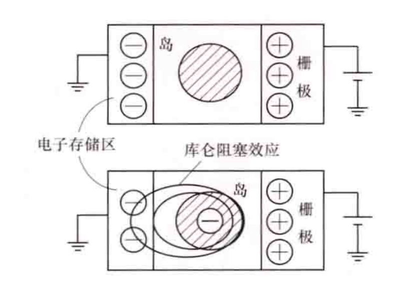


图 2 单电子盒的库仑阻塞效应

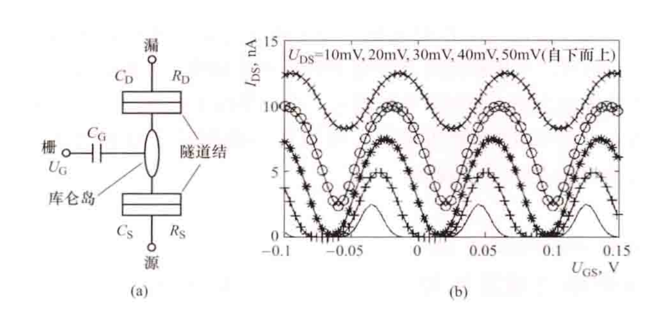


图 3 单电子晶体管

（a）结构示意图；（b）库仑阻塞振荡特性

量子点器件（QD） 量子点是电子的三维自由度均被约束的零维系统结构，可构成二端或三端器件，具有量子效应工作机制。量子点器件主要有量子点元胞自动机（quantum-dot cellular automata，QCA）、量子点激光器、量子点发光二极管和量子点非线性光学器件等。QCA 是一种典型的用量子点实现计算的器件。1993 年，Lent 等人提出了由隧道结、量子点和电子组成的 QCA，它建立在用量子点元胞电荷构型表示二进制信息编码的基础上，具有体积小、无引线集成和功耗低等优点，其高度集成化远超过大规模集成化的极限并达到海森伯不确定原理设定的极限。元胞之间没有电流流动，也没有能量和信息传送给单个的内部元胞。元胞之间的作用力是库仑力，它提供计算所需的功率。由于库仑排斥作用，电子通过隧道结在量子点间隧穿，易于占据元胞内对角线位置，形成两个完全极化态。QCA 分为两种：电性 QCA 和磁性 QCA。实现方法有：利用栅极和绝缘层形成 QCA、利用金属点和隧道结形成 QCA、利用高分子材料形成 QCA。主要特性有：非线性特性和双稳态饱和特性。

纳磁体逻辑器件（NMLD） 运用磁化和磁畴运动来表征信号的二元逻辑器件，它由拉长的单畴纳磁体（其存在形状各向异性）构成。纳磁体逻辑器件的长轴通常被视为易磁化轴，短轴为难磁化轴。磁化方向朝上或朝下分别用于编码逻辑‘1’或‘0’，而沿难磁化轴朝右的磁化则为空态。纳磁体之间的偶极子耦合可以完成信息的处理和信号传递，还产生了两种排序方式，即水平线方向的反铁磁排序和垂直线方向的铁磁排序。这两种排序的组合可实现有用的逻辑电路。NMLD 的优点有：数据掉电后不丢失和可抗辐射。

碳纳米管器件（CNTD） 利用一种具有特殊结构（径向尺寸为纳米级，轴向尺寸可达微米量级）的一维量子材料——碳纳米管构造成的电子器件。碳纳米管具有许多独特而优良的力学性能、电学性能。在电学性质方面，碳纳米管可承载电流密度大，量子电导效应明显，是真正的量子导线。产生量子电导的原因是，当导体的长度小于电子平均自由程时，电子的输运过程是弹道式的，其特点是电子在导体中运动不经过任何散射，没有能量损失，即碳纳米管是弹道输运器件。传统的 CMOS 器件中，载流子的输运方式不是弹道式的，运动过程中会经历多次散射，从而产生焦耳热。因此，弹道输运也从根本上消除了电子器件的散热问题。

分子器件（MD） 具有纳米尺度导电性能的大分子或超分子，周围是绝缘衬底材料，内部是一个约束电子运动的势阱的器件。MD 结构是基于单分子的电子输运性质，主要有两端和三端分子器件，但没有增益。例如分子整流二极管、分子谐振隧道二极管和单分子开关器件等。MD 可分为：①电场控制型开关器件，包括分子量子器件；②电力型开关器件，通过电场力/机械力来改变分子结构或是移动分子来实现电流的通断；③光敏型开关器件，利用光束改变分子的形状或电子组态以实现电流的通断；④电化学型开关器件，利用电化学反应改变分子的形状或电子组态以实现电流的通断。根据器件的不同工作机制，单分子开关器件可分为构象变化型、单分子传输型、内部机械运动型和电势调节型。分子器件的优点是自上而下制备途径（基于化学的自组装）和极小的器件尺寸。

快速单磁通量子器件（RSFQD） 基于超导量子效应的动态逻辑器件，其单磁通量子的存储和传输决定了这种器件的工作行为。最基本的 RSFQD 结构是由一个含有约瑟夫森结（Josephson junction，JJ）的超导环和一个外部旁路电阻构成，存储元件是超导感应环，开关元件是约瑟夫森结。在 RSFQD 的动态逻辑中，闭合超导环存在或不存在磁通量子分别表示信息比特‘1’或‘0’。电路工作时临时打开 JJ，逐出存储的磁通量子，然后经过超导环中的 JJ 产生一个单磁通量子（SFQ）脉冲。脉冲沿着超导传输线传播，并触发各种快速单磁通量子（RSFQ）电路结构。使用快速单磁通量子（RSFQ），电路的工作频率可达 100GHz 以上。

应用 纳电子器件可用于信息处理。以新兴纳电子器件为神经元（如以 QCA 元胞作为神经元，其极化率和量子相位为状态变量）可以实现二维或三维细胞神经网络结构。在大规模信号处理上，纳电子器件细胞神经网络是一种崭新结构，可实现各种图像处理功能，如在线检测、去噪和滤波等。此外，一些纳电子器件具有双稳态特征，特别适用于数字逻辑系统的设计，还可用于实现小尺寸、功耗低和高速的串并行存储器。部分非 CMOS 纳电子器件在临近空间（距

地面 20～100km 的空域）具有重要的军事应用价值。早期的 CMOS 器件和电路采用电子电荷来处理信息，器件在遭受大量空间高能粒子辐射后发生瞬间电荷（电子和空穴）收集，诱发了严重的单粒子效应，导致电路发生逻辑错误甚至烧毁，从而影响临近空间的信息处理和信号传递。NMLD 是一种新机理的纳电子器件，它采用自旋量而非电荷量来编码和处理信息，避免了空间高能粒子辐射在传统硅基 CMOS 芯片上引发的电荷收集效应。利用纳米电子学技术可把传感器、电动机和数字智能装备集中在一块芯片上，制造出几厘米甚至更小的微型装置。

参考书目

蔡理．纳电子器件及其应用［M］．北京：电子工业出版社，2009.

Naikuisitetu

奈奎斯特图 （Nyquist diagram）

当频率 ω 由零变到无穷大时，相量 $G(\mathrm{j}\omega)$ 端点在极坐标系上的轨迹图，又称为极坐标图。在奈奎斯特图上，每一点都可用幅值 $|G(\mathrm{j}\omega)|$ 和相角 $\angle G(\mathrm{j}\omega)$ 表示，$G(\mathrm{j}\omega)$ 相量在实轴和虚轴上的投影分别是 $G(\mathrm{j}\omega)$ 的实部和虚部。奈奎斯特图用于控制系统的分析和设计。

绘制极坐标图可以有两种方法：①根据相应的伯德图数据绘制；②对于若干个频率值直接计算幅值 $|G(\mathrm{j}\omega)|$ 和相角 $\angle G(\mathrm{j}\omega)$ 数据绘制。

极坐标图的优点：可在一张图上描绘出整个频率域的频率响应曲线。不足之处：不能明显地表示出开环传递函数中每个因子的作用。

基本因子的极坐标图如下。

（1）常数因子 K。$G(\mathrm{j}\omega)=K\angle 0^\circ$，其极坐标图是实轴上坐标为 K 的点，见图 1。

（2）积分和微分因子 $(\mathrm{j}\omega)^{\mp 1}$。$(\mathrm{j}\omega)^{-1}$ 是积分因子，$G(\mathrm{j}\omega)=1/\mathrm{j}\omega=|1/\omega|\angle -90^\circ$，极坐标图是整个负虚轴。$\mathrm{j}\omega$ 是微分因子，$G(\mathrm{j}\omega)=\mathrm{j}\omega=|\omega|\angle 90^\circ$，极坐标图是整个正虚轴，见图 1。

（3）一阶因子 $(1+\mathrm{j}\omega T)^{\mp 1}$。对于 $(1+\mathrm{j}\omega T)^{-1}$ 因子，$G(\mathrm{j}\omega)=1/(1+\mathrm{j}\omega T)=\dfrac{1}{\sqrt{1+\omega^2T^2}}\angle -\arctan\omega T$，极坐标图是一半圆，圆心在实轴上 0.5 处，半径为 0.5。对于 $(1+\mathrm{j}\omega T)$ 因子，$G(\mathrm{j}\omega)=1+\mathrm{j}\omega T=\sqrt{1+\omega^2T^2}\angle \arctan\omega T$，极坐标图是复平面上第一象限内通过点（1，j0），且平行于虚轴的直线，见图 2。

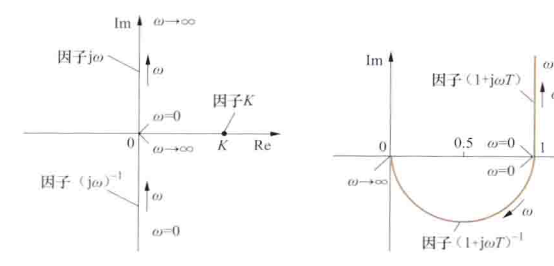


图 1　因子 K 和 $(\mathrm{j}\omega)^{\mp 1}$ 的极坐标图

图 2　因子 $(1+\mathrm{j}\omega T)^{\mp 1}$ 的极坐标图

（4）二阶因子 $[1+2\zeta(\mathrm{j}\omega/\omega_n)+(\mathrm{j}\omega)^2/\omega_n^2]^{\mp 1}$。对于正弦传递函数 $G(\mathrm{j}\omega)=[1+2\zeta(\mathrm{j}\omega/\omega_n)+(\mathrm{j}\omega)^2/\omega_n^2]^{-1}$ $(\zeta>0)$，极坐标图如图 3 所示，极坐标图的低频和高频部分分别为

$$\lim_{\omega\to 0}G(\mathrm{j}\omega)=1\angle 0^\circ$$

$$\lim_{\omega\to\infty}G(\mathrm{j}\omega)=0\angle -180^\circ$$

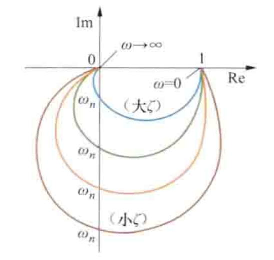


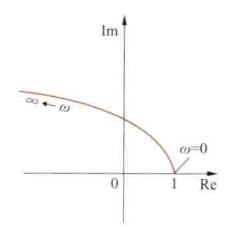
图 3　$[1+2\zeta(\mathrm{j}\omega/\omega_n)+(\mathrm{j}\omega)^2/\omega_n^2]^{-1}$ $(\zeta>0)$ 的极坐标图

对于正弦传递函数 $G(\mathrm{j}\omega)=[1+2\zeta(\mathrm{j}\omega/\omega_n)+(\mathrm{j}\omega)^2/\omega_n^2]$ $(\zeta>0)$，极坐标图如图 4 所示，极坐标图的低频和高频部分分别为

$$\lim_{\omega\to 0}G(\mathrm{j}\omega)=1\angle 0^\circ$$

$$\lim_{\omega\to\infty}G(\mathrm{j}\omega)=\infty\angle 180^\circ$$

（5）传递延迟 $\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega T}$。$G(\mathrm{j}\omega)=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega T}=\cos\omega T-\mathrm{j}\sin\omega T=1\angle -\omega T$，极坐标图为单位圆，见图 5。



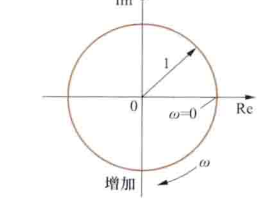


图 4　$[1+2\zeta(\mathrm{j}\omega/\omega_n)+(\mathrm{j}\omega)^2/\omega_n^2]$ $(\zeta>0)$ 的极坐标图

图 5　传递延迟的极坐标图

对于任何一个控制系统，当知道了它的开环传递函数以后，都可以作出相应的开环频率特性极坐标图，并据以分析闭环系统的性能。绘制极坐标图时，在复平面上点（－1，j0）附近，极坐标图要作得准确些，因为这一范围对于分析闭环系统的性能是十分关键的。

Naikuisite wending panju

奈奎斯特稳定判据 （Nyquist stability criterion）

采用图解分析方法，通过开环系统频率特性奈奎斯特图（极坐标图）判断相应的闭环系统稳定性的判据。

判据的表述　如果线性定常控制系统开环传递函数 $G(s)H(s)$ 在右半 s 平面上有 P 个极点，则当 ω 从 $-\infty$ 变化到 $+\infty$ 时，若开环频率特性 $G(\mathrm{j}\omega)H(\mathrm{j}\omega)$ 的轨迹（即奈奎斯特图）逆时针包围复平面上（－1，j0）点 P 次，则相应的闭环系统是稳定的，否则就是不稳定的。

通常，$G(s)H(s)$ 的分母多项式的次数总是高于分子多项式的次数，$\lim\limits_{s\to\infty}G(s)H(s)=0$。

判据的运用可以归结为对下式做检验

$$Z=N+P$$

式中 Z 为闭环特征方程式 $1+G(s)H(s)=0$ 在右半 s 平面根的数目，即在右半 s 平面上的闭环极点数；N 为当 ω 从 $-\infty$ 变化到 $+\infty$ 时，开环频率特性 $G(\mathrm{j}\omega)H(\mathrm{j}\omega)$ 的轨迹包围复平面上（－1，j0）点的次数，顺时针方向包围时为正，逆时针方向包围时为负；P 为开环传递函数 $G(s)H(s)$ 在右半 s 平面上的极点数。

如果闭环系统是稳定的，则必须有 $Z=0$，此时 $N=-P$。这意指，若开环传递函数在右半 s 平面有 P 个极点，则闭环系统稳定的充分必要条件是，当 ω 从 $-\infty$ 变化到 $+\infty$ 时，$G(\mathrm{j}\omega)H(\mathrm{j}\omega)$ 的轨迹必须逆时针包围复平面上（－1，j0）点

P 次。很多线性定常控制系统是开环稳定的，即 $P=0$，则闭环系统稳定的充分必要条件是 $N=0$。换言之，一个开环稳定的系统，如果其频率特性 $G(j\omega)H(j\omega)$ 的轨迹不包围复平面上（-1，j0）点，则系统闭环运行是稳定的，否则是不稳定的。

极坐标图上 $G(-j\omega)H(-j\omega)$ 和 $G(j\omega)H(j\omega)$ 的轨迹对于实轴是对称的，所以作图时只需取 ω 从 0 变化到 $+\infty$ 就可以了，ω 从 0 变化到 $-\infty$ 的轨迹可对称地画出。

应用判据的步骤

（1）求出线性定常控制系统开环传递函数 $G(s)H(s)$。

（2）在极坐标图上作出当 ω 从 0 变化到 $+\infty$ 时 $G(j\omega)H(j\omega)$的轨迹，并对称地做出当 ω 从 0 变化到 $-\infty$ 时的轨迹。

（3）分几种情况讨论闭环系统的稳定性：

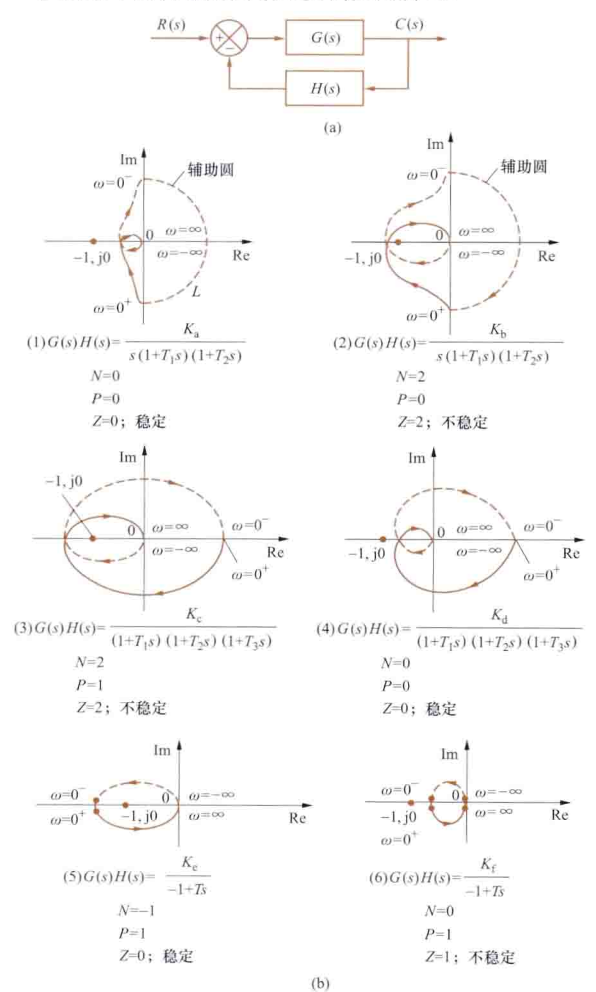
1）轨迹不包围复平面上（-1，j0）点，若 $P=0$（即开环稳定），则闭环系统是稳定的，否则是不稳定的；

2）逆时针包围复平面上（-1，j0）点，若包围的次数等于 P，则闭环系统是稳定的，否则是不稳定的；

3）顺时针包围复平面上（-1，j0）点，闭环系统是不稳定的；

4）如果 $G(s)H(s)$ 形式上是开环稳定的（$P=0$），但实际上在右半 s 平面有相同数目的零点和极点相抵消，则闭环系统是不稳定的。

应用奈奎斯特稳定判据的实例如图所示。



奈奎斯特稳定判据的应用举例

（a）控制系统框图；（b）应用奈奎斯特判据的例子

奈奎斯特稳定判据得到了广泛应用，其原因是：①只要研究开环频率特性，而无须具体地确定闭环极点；②由分析方法或实验方法所获得的开环频率响应曲线，都可以用来进行稳定性的分析，而在设计控制系统时，一些环节的数学模型往往是未知的，仅有其频率响应曲线可资利用；③不仅可以判断系统是否稳定，而且能表示出系统稳定的程度，还能指出应如何改进系统的稳定性；④可以研究具有时间延滞的系统。

naidianhen shiyan

耐电痕试验　（track resistance test）　测定固体绝缘材料耐受表面漏电流而不起痕的能力的试验。耐电痕试验是一种人工加速试验。它模拟非常严重的环境污染，加速电痕的形成，从而能在较短时间内鉴定固体绝缘材料表面的耐电痕能力，也就是固体绝缘材料表面能离解的污物耐受因局部放电在材料表面形成积累导电通道的能力。耐电痕试验方法有滴液法和斜板法两种，后者被广泛采用。

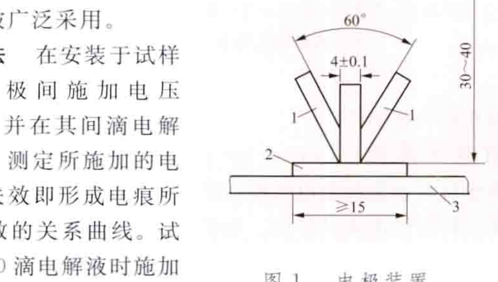


图 1　电极装置

1—电极；2—试样；3—支架；4—滴液装置

滴液法　在安装于试样表面的电极间施加电压（<600V），并在其间滴电解液（图 1），测定所施加的电压与材料失效即形成电痕所需的液滴数的关系曲线。试样能承受 50 滴电解液时施加的电压即为相比起痕指数。

试验线路如图 2 所示。

试样　直径 50mm 或 100mm 的圆板，厚度最小 25mm，试验前应清除灰尘与油污，并作预处理。每次试验最少 5 个试样。

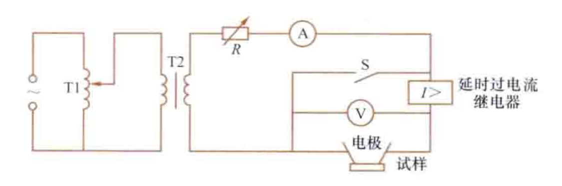


图 2　试验线路

T1—调压器；T2—试验变压器；S—开关

铂电极　5mm×2mm 长方形截面，长最少 20mm，装在合适的柄上。一端削成 30°角。电极的安装见图 1。

电解液与滴液装置　可用氯化铵的蒸馏水或去离子水溶液作电解液，其浓度为（0.1±0.002）%（质量比），在（23±1）℃下的电阻率为（3.95±0.05）Ω·m。电解液应相隔（30±1）s 从 30～40mm 高度滴落于电极中央。液滴大小为（20±5.0）mm^3。

斜板法　用与滴液法相同的电解液滴在上电极夹住的滤纸上并以一定流速流向试样的表面，在上下电极间加一定电压，当电流超过规定值（如 60mA）或是当漏电痕迹达到一定长度（如离下电极 25mm）时作为试验终点，到达终点所经历的时间为 6h 时的最高电压为评定耐电痕的等级。

试验装置如图 3 所示，试验线路如图 4 所示。

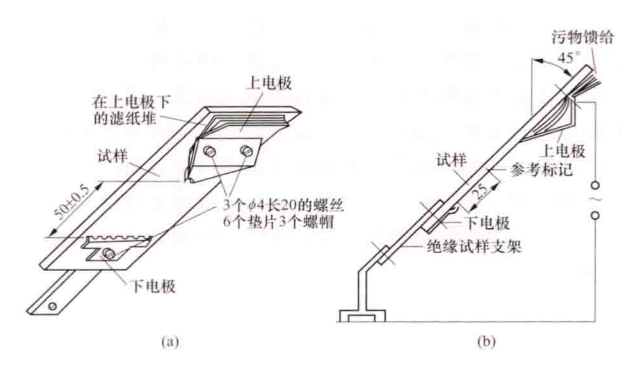


图3 试验装置图（单位：mm）

(a) 电极装置；(b) 试验装置

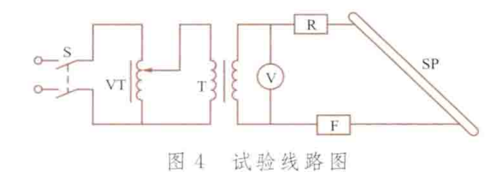


图4 试验线路图

S—开关；VT—调压器；T—变压器；R—电阻器；V—电压表；F—熔断器或过电流继电器；SP—试样

naidianhu shiyan

耐电弧试验 (test for arc resistance) 测试固体绝缘材料表面耐受电弧能力的试验。耐电弧试验的目的是判断材料耐受电弧的性能。电器中发生的电弧可以有高压小电流或大电流电弧、低压大电流或小电流电弧等。试验方法应按实际情况制订。

高压小电流耐电弧试验原理 材料的耐电弧性是耐热性的特种形式。当材料表面发生电弧时，材料表面会产生导电层，最终形成导电通道，致使电弧熄灭。通常材料表面形成导电层所需的电流愈大，或所需的时间愈长，则表明这种材料的耐电弧性愈高。试验时将试样置于两电极间，在两电极上加电压，使沿材料表面产生规定的电弧电流，促使材料表面形成导电层，直至电弧熄灭。由所经历的时间来判断其耐电弧性。

试样与电极 采用厚度为3mm的平板试样和直径2.4mm、长约20mm的钨棒电极。试样应擦净，并作预处理。电极端面应磨出与轴线成30°±1°的椭圆。装配后电极尖端相距（6.35±0.05)mm，并与水平面成35°倾角。每个电极有(500±50)N的力作用在试样表面。整个电极装置放在有出风口的透明防风罩内。

naidianyun shiyan

耐电晕试验 (corona resistance test) 测定绝缘材料在表面局部放电或电晕下承受电压耐久性的试验。即在试样上施加一定电压，在表面放电情况下，测试直至试样击穿的能力。

相比耐电晕性的测量原理 在试样上施加足够高的工频电压（超过起始放电电压），使试样表面产生局部放电，直到材料击穿。测定两种相同厚度的材料在相同电极形状与电压下的相对失效时间即为相比耐电晕性。材料耐电晕性的比较也可用在规定时间下为使材料失效所需施加的场强值表示，也可在三个或三个以上电压下求取失效时间，绘制场强—失效时间关系曲线。

试验线路 高压电源与工频击穿试验用的线路相同。每个试样应串联一个限流电阻和熔断器，以便任一试样击穿时，其他试样继续进行试验，并触动失效时间指示装置。

试样与电极 试样为平板。上电极为直径（6±0.3)mm不锈钢圆柱，边缘为半径1mm的圆角，重约30g。下电极为平板，其面积应大于上电极放电时所覆盖的面积。一块试样上可放置多个电极，极间应有足够的距离。

试验条件 试验前试样应作预处理。预处理条件分为低湿度试验气氛和标准试验气氛。试验可在室温、低湿度［23℃、5%RH(RH：相对湿度)］或标准条件（23℃、50%RH)下进行。对每个试验电极空气气流至少为0.5L/min。在特殊情况下可在高温或其他媒质中进行试验。

naigaowen cailiao

耐高温材料 (high temperature endurable materials)

通常指在150℃以上使用，能保持其物理机械性能不变的材料。包括无机陶瓷材料，特殊结构的聚合物材料和有机物与无机物结合的复合材料。材料用于高温环境的情况取决于温度和时间两个因素。提高使用温度，相应地就会缩短使用寿命。耐高温聚合物材料是指能在250℃下长期使用、在500℃间歇使用、在1000℃以上短期使用的材料。

在喷气发动机、燃气轮机、核反应器和高温操作条件下的电气设备、光学仪器中，耐高温材料都是不可缺少的材料。例如用于电气设备中的绝缘材料的耐热性就直接影响设备运行的可靠性、寿命、容量和体积。在长期耐高温方面，聚合物材料不如金属材料，但在短期耐高温方面，金属反不如聚合物。例如导弹与宇宙飞船等飞行器在返回地面时，其头锥部在几秒至几分钟内将经受11 000～16 700℃的高温，此时任何金属都将熔化，如果使用聚合物材料，尽管外部温度高达10 000℃以上，聚合物外层熔融乃至分解，但由于聚合物优良的绝热性，在这样短时间里只有表面一层受到烧蚀，而飞行器的内部仍然完好如故。所以耐高温聚合物材料用作烧蚀材料、耐高温黏结剂、高温导线涂层材料和绝缘薄膜材料等引起了极大的重视。有机聚合物材料与金属材料和无机陶瓷材料相比，在高温环境下易于软化或者熔融，使物理机械性能变坏；也易于发生热分解、氧化降解而丧失使用性能。提高聚合物材料耐高温性的途径是合成带芳杂环骨架结构的聚合物、有机金属聚合物、有机硅聚合物、含氟聚合物等。采用有机物与无机填料（碳纤维、硼纤维、氧化铝纤维、磷酸盐纤维等）的复合，可以获得高耐热性、高强度的材料，以满足各种高性能和高功能的特殊产品的需要。例如美国ICI公司开发的聚醚酮（Victrex）是耐高温、结晶的热塑性树脂，加入30%玻璃纤维进行复合，其热变形温度为340℃，主要用于航空、化学、电气和电子工业。

naiya shiyan

耐压试验 (voltage withstand tests) 按规定的加压方式对电气设备或绝缘结构施加规定电压以考验其耐受电压能力的试验。耐压试验以试品不被击穿或闪络作为通过试验的主要判据。由于施加电压较高，在绝缘中某些地方会出

现较高的电场强度致使绝缘有可能造成局部损伤，因此它是一种破坏性绝缘试验。

耐压试验的种类及施加电压水平，由被试产品或绝缘结构所处运行电压等级的绝缘配合来确定。它应该对运行中可能出现的过电压状态进行考核。由于试验只能是短时间的或者是次数有限的，因此试验水平必须高于过电压水平，以保证有足够的安全裕度。耐压试验按施加电压的种类可分为交流耐压试验、冲击耐压试验和直流耐压试验。

交流耐压试验　通常称为一分钟工频耐压试验，因为此项试验在多数情况下是采用50Hz（某些国家用60Hz）正弦交流电压，在规定的电压值下持续时间为1min。交流耐压试验按试验电压的取得方式有外施耐压试验和感应耐压试验两种。外施耐压试验是由试验变压器或其他装置提供试验电压，直接施加在与被试端子相连的全部金属电极上。感应耐压试验由于电压较高，为避免铁芯中的磁饱和，需采用频率高于工频的交流电压，但施加电压的时间应按规定缩短。对电容量较大的试品也有采用频率很低的交流电压（例如0.1Hz），但施加的电压值应有所增加。

冲击耐压试验　按施加的冲击电压性质可分为雷电冲击耐压试验和操作冲击耐压试验。雷电冲击耐压试验又有全波冲击和截波冲击两种。冲击耐压试验是用于考验设备耐受雷电波和操作波的能力。由于试验技术复杂，仅在型式试验或某些超高压重要设备的出厂试验中进行。冲击试验电压由冲击电压发生器提供，对于变压器类产品也可以采用向低压侧放电使高压侧感应出所需的操作冲击试验电压。

直流耐压试验　对直流设备或有直流分量的整流设备，必须用短时间直流耐压试验来考验其绝缘强度。有些交流设备，例如电力电缆和发电机，由于电容值很大，采用直流耐压试验可使试验设备容量减小，适合于交接试验和运行设备的预防性试验。直流电压下绝缘中的电场分布与交流下是很不相同的，两种试验不能完全等效。直流耐压试验对发现贯穿性缺陷比较有效。

neibu guodianya

内部过电压

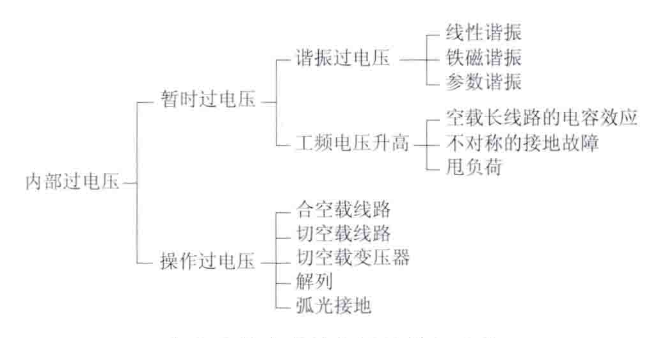
(internal overvoltage)　电力系统内部在故障或开关操作时发生电磁能的振荡或传递引起的过电压。内部过电压的能量来源于电力系统本身，故其幅值大体与相电压成正比。内部过电压的大小通常用其幅值与最高相电压幅值之比来表示，称为内部过电压倍数，它与电力系统的结构、元件的参数、中性点的接地方式、故障的位置与性质，以及具体的操作过程等因素有关，具有一定的统计规律性。

电力系统内部过电压分为操作过电压和暂时过电压两类。

操作过电压　在故障或操作瞬间所发生的过渡过程过电压，其持续时间为毫秒级。

暂时过电压　在故障或操作瞬间所发生的过渡过程结束后出现的稳态性质的过电压。它在系统发生新的操作之前可能始终保持，持续时间达到数秒钟以至数分钟以上。暂时过电压分为工频过电压和谐振过电压两种。空载线路中的电容效应是产生工频过电压的主要原因，在超高压长线路中尤为突出，需要采取并联电抗器等补偿措施加以限制。谐振过电压主要发生在由变压器铁芯励磁电感或同步电机的时变电感及其端部电容所组成的串联振荡回路中，最高幅值可达相电压的两倍以上，对电气设备的绝缘造成威胁，需要针对具体情况采取专门措施加以消除或者限制它们的存在时间。

电力系统内部过电压进一步的详细分类见图。



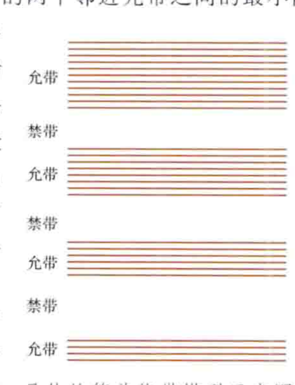
电力系统内部过电压的详细分类

nengdai lilun

能带理论

(energy band theory)　用单电子近似方法研究固体中电子能谱的理论。它是在用量子力学研究物质的电导理论的过程中发展起来的。最早关于固体中电子能量状态的理论是金属自由电子论，这种简单理论认为金属中价电子的运动，除去和金属离子碰撞外，基本上是自由的，这较好地解释了金属所具有的良好的导电性和导热性。但是这一理论没有考虑晶格周期性势场的作用，因而具有很大的局限性。它不能解释固体为什么分为导体、半导体和绝缘体。

实际上，晶体由大量原子组成，每个原子又包含原子核及许多电子，它们之间存在着相互作用，每一个电子的运动都受到原子核及其他电子的影响。要研究一个电子的运动，严格说来，必须写出这个包含大量原子核及电子的多体系统的薛定谔方程，并求出此方程的解。要求出薛定谔方程的严格解是很困难的，通常采用单电子近似方法，把多体问题简化为单电子问题。这种近似方法包括两个步骤：第一步，假设晶体中的原子核固定在各自的平衡位置上不动，把一个多体问题简化成一个多电子问题；第二步，假设每个电子是在固定的原子核的势场及其他电子的平均势场中运动，把多电子问题简化为单电子问题。用这种方法研究晶体中的电子运动，表明晶体中电子许可的能量状态，将不再是分立的能级，而是由在一定范围内准连续分布的能级组成的能带（称为允带）。两个相邻允带之间的区域称为禁带。能级被电子占满的能带称为满带。能级全空着，没有电子占据的能带称为空带。被价电子占有的允带称为价带。由一个禁带隔开的两个邻近允带之间的最小能量差称为能隙。通常用价电子占据的满带及其上面的空带讨论物质导电情况。由于外界条件的作用，价带中的电子可跃迁到上面的空带中去，价带由满带变为不满带，空带中有了电子称为导带。图中所示为一个简单能带模型情况。



晶体的简单能带模型示意图

一种晶体的各个允许能带有一定的宽度，能量高的能带较宽，能量低的能带较窄，每

一个能带里包含的能级数目等于晶体所包含的原胞数目。

能带理论成功地解释了金属、半导体和绝缘体之间的差别，以及正霍耳系数出现的原因。并且已广泛用于晶体特别是半导体的电学、光学和磁学性质的研究中，这一理论已成为固体电子理论的重要组成部分。但是必须指出，它终究是经过了若干简化以后的近似理论，也有其局限性，例如它不能解释金属-绝缘体转变现象，故需要进一步完善和发展。

Nikeersitu

尼科尔斯图 (Nichols diagram)　以频率 ω 为参变数，在直角坐标系上表示 $G(\mathrm{j}\omega)$ 的对数幅值（以分贝表示）与相角的关系图，也称为对数幅值-相位图，简称对数幅-相图。尼科尔斯图用于控制系统的分析和设计。在伯德图上，频率特性 $G(\mathrm{j}\omega)$ 是在半对数坐标系上用分开的两条曲线即对数幅值曲线和相角曲线表示的，尼科尔斯图把伯德图的两条曲线合并为一条。所以，尼科尔斯图可以很方便地根据伯德图上的数据绘制出来。

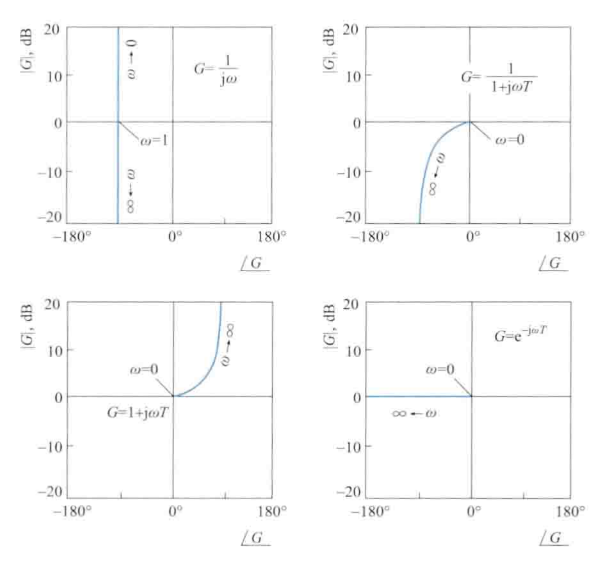
频率特性 $G(\mathrm{j}\omega)$ 和 $1/G(\mathrm{j}\omega)$ 的对数幅-相图对于原点是斜对称的，这是因为

$$20\lg\left|\frac{1}{G(\mathrm{j}\omega)}\right| = -20\lg|G(\mathrm{j}\omega)|$$

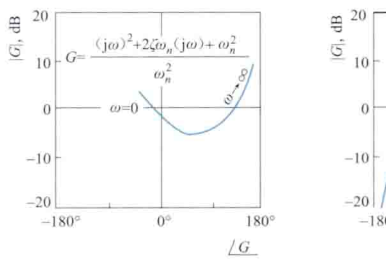
和

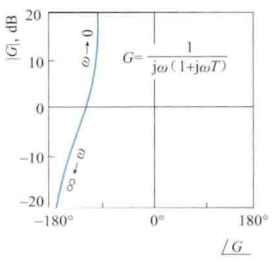
$$\angle\frac{1}{G(\mathrm{j}\omega)} = -\angle G(\mathrm{j}\omega)$$

一些简单环节频率特性的对数幅-相图如图所示。



简单环节频率特性的对数幅-相图（一）





简单环节频率特性的对数幅-相图（二）

Nuodun dingli

诺顿定理 (Norton theorem)　把一个复杂的有源线性非时变二端网络等效为一个最简单的含电流源的有源二端网络的定理。它由美国工程师 E. L. 诺顿（E. L. Norton）在 1898 年提出。

正弦交流电路中的诺顿定理　任一有源线性非时变二端网络 N，对外可用一电流源和一等效阻抗的并联组合来等效（图 1）。此电流源的电流 $\underline{I}_{sc}$ 等于二端网络 N 端口的短路电流，等效阻抗 $\underline{Z}_{eq}$ 等于二端网络 N 的全部独立电源置零后端口的输入阻抗（图 2）。电流源 $\underline{I}_{sc}$ 和阻抗 $\underline{Z}_{eq}$ 的并联组合也称诺顿等效电路。

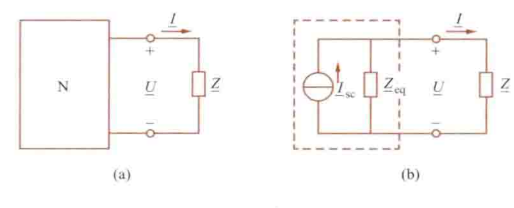


图 1　诺顿定理

(a) 原电路；(b) 诺顿等效电路

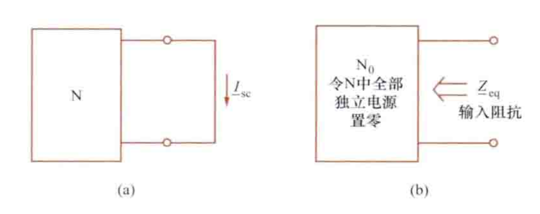


图 2　短路电流和输入阻抗

(a) 短路电流 $\underline{I}_{sc}$；(b) 输入阻抗 $\underline{Z}_{eq}$

应用　使用诺顿定理时对二端网络 N 的要求、诺顿定理的应用与推广均与戴维南定理相同。



Oula-Lagelangri fangcheng

欧拉-拉格朗日方程 (Euler-Lagrange equation)

见变分法。

oumu

欧姆 (ohm) 国际单位制(SI)中电阻、电抗、阻抗等量的单位。欧姆简称欧，符号是 Ω。当导线中不存在电动势，在导线的两点即两个等位面之间加 1 V 恒定电压时可产生 1 A 恒定电流，则此两点间导线的电阻定义为 1Ω。图为欧姆的画像，电阻的单位是以他的名字命名的。



欧姆(Georg Simon Ohm，1789—1854)

Oumu dinglü

欧姆定律 (Ohm's law) 揭示一段导体中流过的电流与该段导体两端电压成正比关系的法则。1827 年由德国电学家 G. S. 欧姆(G. S. Ohm，1789—1854)对各种金属导体进行了大量实验后总结得出。欧姆定律的数学表达式是

$$U = RI$$

式中 U 为导体两端的电压，R 为导体的电阻，I 为导体中的电流。对大多数导体来说，当其两端电压(或流过的电流)在相当大范围内变动时，电阻 R 几乎保持不变。这时电压与电流之间存在线性关系，满足欧姆定律。

欧姆定律的微分形式　在有电流流通的线性、各向同性、均匀导体内部，各点的电流密度 $\boldsymbol{J}$ 与电场强度 $\boldsymbol{E}$ 呈线性关系，即

$$\boldsymbol{J} = \gamma \boldsymbol{E}$$

其中常量 γ 是该导体的电导率。这个表达式也叫欧姆定律的微分形式。在电源内部导电介质中，还存在有局外电场强度 $\boldsymbol{E}'$(见恒定电场)，这时的欧姆定律微分形式是

$$\boldsymbol{J} = \gamma(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{E}')$$

式中 γ 为介质的电导率。

欧姆定律的适用范围　对有些导体(电离气体等)和半导体，欧姆定律明显地不再满足。它们的电压与电流之间的关系可用一曲线表示，这个关系曲线叫伏-安特性曲线。这类导体和半导体的元件被认为具有非线性电阻。在电工技术中(特别是电子电路中)，非线性电阻有着广泛的应用。

Ouwen dianqiao

欧文电桥 (Owen bridge) 见交流电桥。



PASCAL yuyan

PASCAL 语言 (PASCAL) 见程序设计语言。

PID tiaojieqi

PID 调节器 (proportion integration differentiation regulator，PID regulator) 一种有源的比例＋积分＋微分校正装置，又称 PID 控制器。在工业过程控制中有着最广泛的应用。其实现方式有电气式、气动式和液压式。与无源校正装置相比，它具有结构简单、参数易于整定、应用面广等特点，设计的控制对象可以有精确模型，并可以是黑箱或灰箱系统。

特点 ①结构简单。应用方便，参数整定灵活。②适用性广。可广泛应用于电力、化工、机械等工业领域和相关军事领域。③鲁棒性强。即系统的控制质量对内部及外部参数的变化不敏感。

原理 图 1 给出了典型 PID 控制结构框图。

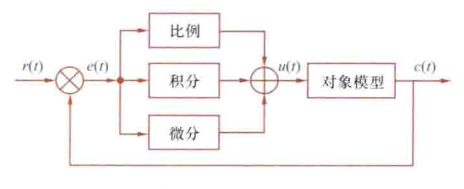


图 1 典型 PID 控制结构框图

由图 1 所示，PID 控制器是通加对误差信号 $e(t)$ 进行比例、积分和微分运算和其结果的加权，得到控制器的输出 $u(t)$，该值就是控制对象的控制量。PID 控制器的数学描述为

$$u(t) = K_p\left[e(t) + \frac{1}{T_i}\int e(t)\mathrm{d}t + T_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right] \quad (1)$$

式中 $u(t)$ 为控制输入，$e(t) = \gamma(t) - c(t)$ 为误差信号，$\gamma(t)$为输入量，$c(t)$ 为输出量。(见控制作用)

在实际控制系统中，单纯采用 PD 控制的系统较少，主要有两方面原因，一是纯微分环节在实际中无法实现；其次，若采用 PD 控制器，则系统各环节中的任何扰动均将对系统的输出产生较大的波动，尤其对跳变信号，情况将更加严重，因此也不利于系统动态性能的真正改善。

实际的 PID 控制器的传递函数如下式

$$G_c(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N}s}\right) \quad (2)$$

式中 N 一般大于 10。当 $N\to\infty$ 时，上式即为理想的 PID 控制器。

参数整定方法 Zieloger-Niclosls 整定公式是一种针对带有时延环节的一阶系统而提出的实用经验公式，是 PID 调节器最常用的参数整定方法之一。系统设定为如下形式：

$$G(s) = \frac{K\cdot e^{-\tau s}}{1 + Ts} \quad (3)$$

在实际的控制系统中，尤其对于一些无法用机理方法进行建模的生产过程，大量的系统可用此模型近似。在此基础上，可分别用时域法和频域法对模型参数进行整定。

基于时域响应的 PID 参数整定方法有阶跃响应整定和等幅振荡整定两种方法：

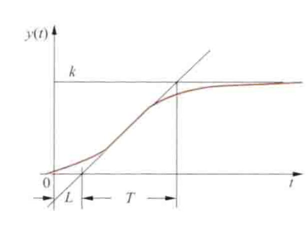


图 2 一阶时延系统阶跃响应

(1) 阶跃响应整定：设想对被控对象（开环系统）施加一个阶跃信号，通过实验方法，测出其响应信号，如图 2 所示，则可由图中输出信号的形状近似确定参数 k、L 和 T（或 a），其中 $a = k\frac{L}{T}$。如果获得了参数 k、L 和 T（或 a）后，则可根据表确定 PID 控制器的有关参数。

PID 参数整定表

调节器类型	阶跃响应整定			等幅振荡整定		
	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$	∞	0	$0.5K_p'$	∞	0
PI	$0.9/a$	$3L$	0	$0.45K_p'$	$0.833P'$	0
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$	$0.6K_p'$	$0.5P'$	$0.125P'$

(2) 等幅振荡整定：设系统为只有比例控制的闭环系统，当 K_p 增大到 K_p'时，闭环系统若能产生等幅振荡，如图 3 所示，测出其振荡周期 P' 及临界增益 K_p'，然后根据表整定 PID 参数。

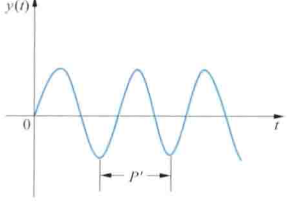


图 3 系统等幅振荡

参考书目

颜文俊，等．控制理论 CAI 教程．3 版．北京：科学出版社，2011.

Ogata K．现代控制工程．卢伯英，于海勋，等译．北京：电子工业出版社，2000.

PMOS jicheng luojimen

PMOS 集成逻辑门 (PMOS integrated logic gate) 全部用 P 沟道 MOS 管构成的集成逻辑门电路，又称 PMOS 集成门。在工作速度方面 NMOS 优于 PMOS，在功耗方面 CMOS 比 PMOS 更低，因而 PMOS 已逐渐被 NMOS 和 CMOS 所取代。由于 PMOS 工艺简单、价格便宜，在一些中、小规模数控电路中仍被使用。

pichuli xitong

批处理系统 (batch processing system) 见操作系统。

pinlü

频率 (frequency) 周期性变化的物理量每秒所经历的周期数。一般以 f 表示，$f=1/T$，T 为周期，频率的单位名称为赫兹（Hz），简称赫。在通常的稳态情况下，电力系统的频率基本保持恒定，允许偏差不超过±(0.5%～1%)，可视为常数（中国和欧洲国家采用 50Hz，美国和北美国家采用 60Hz），且全系统频率相同。频率是衡量电能质量的重要指标之一。

正弦电流的数学表达式为

$$i(t)=I_m\cos\theta=I_m\cos(\omega t+\varphi)$$

式中 $\theta=(\omega t+\varphi)$ 是正弦量的相位，它反映了正弦变量的变化进程。正弦量相位随时间的变化率称为正弦变量的角频率，即

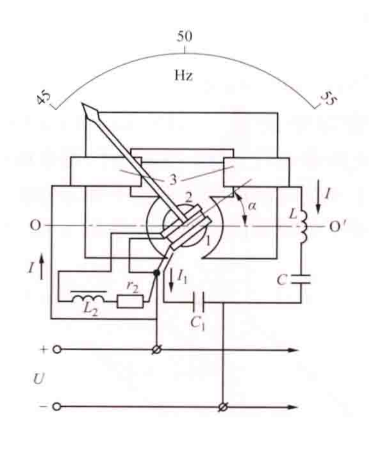
$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(\omega t+\varphi)}{\mathrm{d}t}=\omega$$

ω 的单位名称是弧度每秒（rad/s），频率与角频率的关系为 $f=\frac{\omega}{2\pi}$。

pinlübiao

频率表 (frequency meter) 测量周期性变化电参量频率的电表。有电动系、铁磁电动系、电磁系、变换器式等型式的频率表及数字频率表。

用于监视 50Hz 工频用的配电盘式频率表，大多采用铁磁电动系测量机构。图中所示为铁磁电动系频率表的结构和线路。其中，固定线圈 3、电感 L 和电容 C 组成串联谐振支路。选择适当的该支路参数，可使谐振发生在标尺中间频率如 50Hz 处。可动部分包括两个平行的线圈，其中线圈 2 经电阻 r_2 和电感 L_2 形成闭合回路。当可动部分相对中性线 O-O′偏离 α 角时，线圈 2 将产生与 α 成正比、并使可动部分返回 O-O′位置的反作用力矩；线圈 1 经电容 C_1 再与串联谐振支路并联，用以产生转动力矩。将电源电压 U 加到频率表两端，当被测频率等于标尺中间的频率时，谐振电路发生串联谐振，此时铁芯上静止线圈 3 中的电流 i 与线圈 1 中电流 i_1 在相位上差 90°，从而使转动力矩为 0；于是，可动部分在线圈 2 的作用下，使线圈平面与中性线 O-O′重合，此时指针指在标尺中间的频率，即 50Hz 处。当被测信号的频率偏离标尺中间的频率时，由于谐振条件被破坏，产生转动力矩，线圈偏离 O-O′位置，直至转动力矩与反作用力矩相平衡为止；结果，频率表可动部分停在与被测频率相对应的位置处。以上说明，当频率表线路中各参数确定后，其偏转角仅是被测频率的函数，且每一频率对应于一个确定的偏转角。



铁磁电动系频率表

铁磁电动系频率表虽抗外磁场干扰能力强，功耗小，但由于存在磁滞误差和交流频率误差，其准确度不高。在要求高准确度的场合，应选用数字频率表。

pinlü celiang

频率测量 (frequency measurement) 单位时间内周期信号波形重复次数的测量。频率的单位为赫（Hz）。测量方法有频率表法、波形计数法、利萨如图形法、频率电桥法、电容器充放电法等。

频率表法　对工频及低频信号频率的测量，可采用机械式频率表或数字频率表。对音频和更高频信号频率的测量，可使用数字频率表。

波形计数法　将频率为 f 的被测信号接至示波器的 Y 轴输入端，接至 X 轴输入端的则是示波器内部的线性扫描电压。调节扫描电压的频率 f_0，当示波器屏幕上被测信号的波形重复数为 n 时，被测频率 $f=nf_0$。

利萨如图形法　将频率为 f 的被测信号与频率为 f_N 的可变标准信号进行比较，通过对示波器屏幕上图形的鉴别来确定被测信号频率。标准频率电压信号和被测频率电压信号分别加到示波器 X 轴、Y 轴输入端，由于两信号的频率、相位可能都不一致，因此屏幕上的图形也各种各样。调节标准电压信号的频率，使得两信号的频率间成一定倍数或分倍数关系以及有不同相移时，示波器屏幕上将出现如图 1 所示的利萨如图形。根据图形和标准信号频率，就可确定被测信号的频率。例如当示波器屏幕上显示出如图 1 第 4 行所示的图形，说明标准信号与被测信号频率之比 $f_N/f=1/4$，因此 $f=4f_N$。

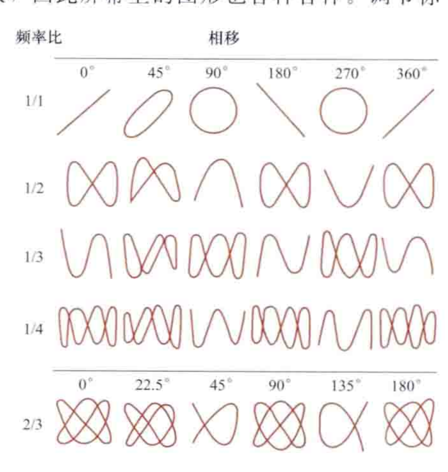


图 1　利萨如图形法示意图

频率电桥法　可用平衡条件与频率有关的各种交流电桥测量频率。

电容器充放电法　原理接线如图 2 所示。开关 S 受频率为 f 的被测信号控制，以同样频率 f 动作，使标准电容器 C 时而被直流电源 E 充电，时而又放电。每次充电的电荷量为 CE，因而每秒通过直流电流表的电荷量即电流 $I=fCE$。由电源电动势 E、标准电容器电容量 C 及电流表示数 I，根据公式 $f=I/(CE)$ 即可求得被测频率 f。

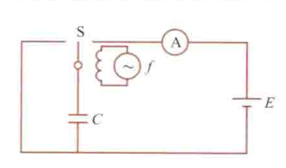


图 2　用电容器充放电法测量频率

pinlü xiangyingfa

频率响应法 (frequency response method) 利用系统的频率响应特性，在频域中对控制系统进行分析和设计

的一种方法，也称为频率特性法或简称频率法。在时域中分析和设计控制系统（特别是高阶系统）往往是很困难的，而频域中的一些图解法则可以较方便地用来分析和设计控制系统。用频率法分析和设计控制系统时，首先获得控制系统的频率响应特性（系统对正弦输入的稳态响应），然后根据时域和频域之间的关系获得控制系统的时间响应特性。频率响应法是一种分析和设计控制系统的间接方法。

频率响应法的主要优点有：①可用系统的开环频率特性研究闭环系统的稳定性，而不必求解特征方程式的根；②系统的频率特性可以用频率响应实验确定，这对于某些难以用分析方法确定传递函数的环节和系统有很大的实际意义；③用频率响应法设计的系统能够抑制或排除某些频率的噪声；④频率响应法还可以用于某些非线性控制系统的分析和设计。

将纯虚数 $j\omega$ 置换系统传递函数 $G(s)$ 中的复变量 s，就得到系统的频率特性（或称正弦传递函数，或频率传递函数）$G(j\omega)$，频率特性是传递函数的一种表现形式。

一个稳定的线性定常系统，在正弦输入信号作用下，它的稳态输出是与输入信号同频率的正弦函数，但振幅和相位与输入信号不同。频率特性 $G(j\omega)$ 是一个复数量，可以写成极坐标形式

$$G(j\omega)=|G(j\omega)|\ \exp\ \angle jG(j\omega)$$

也可以写成直角坐标形式

$$G(j\omega)=R(\omega)+jI(\omega)$$

$|G(j\omega)|$ 为稳态输出与输入的振幅比，$\angle jG(j\omega)$ 为稳态输出与输入的相位差，它们随频率 ω 变化的关系分别称为系统的幅频特性和相频特性。$R(\omega)$ 和 $I(\omega)$ 则分别称为系统的实频特性和虚频特性。

工程上运用频率响应法研究控制系统时，往往采用图解法，因为这样能更方便而迅速地获得问题的近似解。频率特性法通常有三种图形表示法：

(1) 对数坐标图，即伯德图。

(2) 极坐标图，即奈奎斯特图。

(3) 对数幅值-相位图，即尼科尔斯图。

pinpu

频谱 (frequency spectrum) 见非正弦周期电流电路。

pinghengdian

平衡点 (equilibrium point) 见相平面法。

pinghua

平滑 (smoothing) 见卡尔曼滤波。

pingjun gonglü

平均功率 (average power) 一周期内二端电路吸收或发出的瞬时功率的平均值，又称有功功率或有效功率，简称功率。令 P 表示平均功率、$p(t)$ 代表瞬时功率、T 为周期，则

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p(t)\mathrm{d}t$$

若二端电路的电流和电压是同频率的正弦量，则该电路吸收（或发出）的平均功率 P 为

$$P=UI\cos\varphi$$

式中 U 和 I 分别是电压和电流的有效值，φ 是电压和电流之间的相位差角。

当电流和电压波形是同周期的非正弦量时，可将它们展开成傅里叶级数。将直流分量和基波分别当作零次和一次谐波看待，则二端电路吸收（或发出）的平均功率等于其所含各次谐波的平均功率之和，即

$$P=\sum_{n=0,1,2\cdots}P_n=\sum_{n=0,1,2\cdots}U_nI_n\cos\varphi_n$$

式中 U_n 和 I_n 分别是第 n 次谐波电压和电流的有效值；φ_n 是它们之间的相位差角，而且规定 $\varphi_0=0$。通常规定，用户吸收平均功率时的有功功率为正值，发出平均功率时的有功功率为负值。

pingjunzhi

平均值 (average value) 一个量的各瞬时值或其绝对值在某一规定时间间隔内的算术平均值。当物理量是周期量时，此时间间隔通常选一个周期。因此，周期电流瞬时值 $i(t)$ 的平均值 $\bar{I}$ 为

$$\bar{I}=\frac{1}{T}\int_0^T i(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

根据式（1），正弦电流在整个周期内的平均值等于零；非正弦电流在整个周期内的平均值等于它的直流分量。

如果用 $i(t)$ 的绝对值的算术平均值来定义平均值 $\bar{I}$，则

$$\bar{I}=\frac{1}{T}\int_0^T |i(t)|\mathrm{d}t \tag{2}$$

由式（2）得到的周期电流的平均值，应理解为该电流经过理想全波整流后的平均值。对于正弦电流 $i(t)=\sqrt{2}I\cos\omega t$，式中 I 为有效值，ω 为角频率，则平均值为 $\bar{I}=\frac{1}{T}\int_0^T\sqrt{2}I|\cos\omega t|\mathrm{d}t=\frac{2\sqrt{2}}{\pi}I\approx0.9I$。对于正弦交流电压等其他物理量，由式（2）得到的平均值也近似等于有效值的 90%。

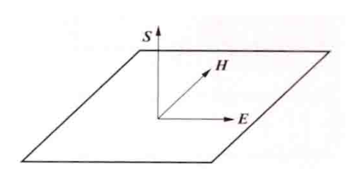
正弦电流电路的平均功率 P，只采用类似式（1）的计算公式。

Poyinting shiliang

坡印亭矢量 (Poynting vector) 表示电磁场中电磁能量流的矢量，它的方向是电磁能流的方向，它的大小等于单位时间内穿过垂直于该方向的单位面积的电磁能量。坡印亭矢量是由英国物理学家 J. H. 坡印亭（J. H. Poynting，1852—1914）提出的。坡印亭矢量 $\boldsymbol{S}$ 与电场强度 $\boldsymbol{E}$ 及磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 的关系为

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H}$$

在国际单位制（SI）中，$\boldsymbol{S}$ 的单位为瓦［特］每平方米（W/m^2）。如图所示，矢量 $\boldsymbol{S}$ 垂直于 $\boldsymbol{E}$ 与 $\boldsymbol{H}$ 构成的平面。坡印亭矢量的闭合面积分表示穿出该闭合面的电磁能流 P



矢量 $\boldsymbol{S}$ 垂直于 $\boldsymbol{E}$ 与 $\boldsymbol{H}$ 构成的平面

$$P = \oint_A \boldsymbol{S} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{A}$$

式中 A 是闭合面。

电磁场中的能量流动和转换可以通过坡印亭定理来说明。坡印亭定理：在任意场域内局外场所提供的功率 P_g，一部分转换为焦耳热功率 P_d，一部分用于增加场域内的电磁功率 P_W，其余的功率就是穿过闭合面向外输送的功率 P，即

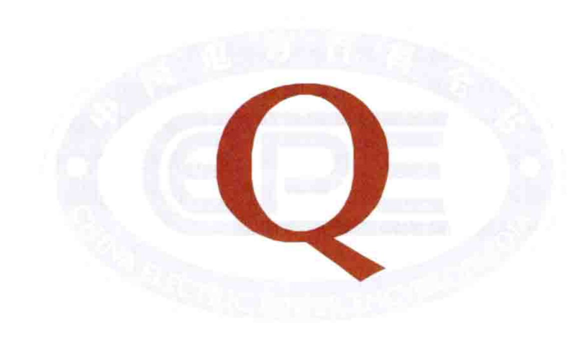
$$P = P_g - P_d - P_W$$

式中 $P_W = \mathrm{d}W/\mathrm{d}t$；$W$ 为场域内储存的电场能量与磁场能量之和；t 为时间。坡印亭定理表达式也可写成

$$\oint_A \boldsymbol{S} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{A} = P_g - P_d - \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}$$

坡印亭定理是根据麦克斯韦方程组得到的。

由坡印亭定理可知，电磁能量靠电磁场传递。例如从变电站到负荷中心架设的输电线本身并不传递能量，输电线的作用只是在其周围形成一种电磁场，这个场把电磁能量从变电站一端送到负荷端。在无线电工程中，没有输电线，电磁能量靠电磁场传递的特点就更为明显。



qidian

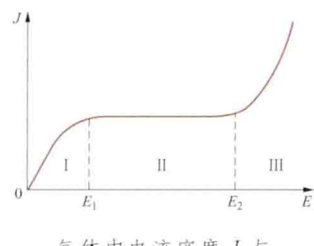
奇点 (singular point) 见相平面法。

qiti dianjiezhi diandao

气体电介质电导 (electrical conduction in gaseous dielectrics) 在外电场作用下气体的导电性能。气体电介质在低于气体击穿电场强度下，漏电流极小时可认为是绝缘体（电流密度 $J<10^{-10}\,A/m^2$）。

气体电介质中的载流子主要是由于气体受到紫外光或宇宙线辐射以及强热等物理因素的作用，分子发生电离产生正离子和电子对，或阴极受激发射出电子而形成。这些载流子在电场的作用下漂移产生传导电流。这就是气体电介质电导的成因。

气体电介质中电流与电压的关系，就总体而言并非完全呈线性关系，故不能用单一的电导率来表征。通常其伏安特性可分为三个区：线性区、饱和区和碰撞电离区。图中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别代表以上三个区。在线性区（Ⅰ），气体电介质中电场强度较低（$E<E_1$），产生的载流子主要通过相互复合而平衡，可形成一较稳定的载流子浓度。在载流子迁移率与电场无关的情况下，电导率 γ 为一与电场无关的常数，伏安特性呈线性。在饱和区（Ⅱ）（$E_1<E<E_2$），由电离形成的离子已来不及相互复合而几乎全部被电场吸引到电极上复合，因而气体电介质中的电流密度趋于饱和而与电场无关。在碰撞电离区（Ⅲ），由于电场强度进一步增加（$E>E_2$），气体中的载流子在强电场的作用下加速并积累能量。当在自由行程区间中载流子所积累的动能超过气体分子的电离能时，分子则被碰撞电离，此时气体中的电流密度 J 将随电场强度 E 的增高呈指数关系剧烈上升。电场强度再增加，气体将发生击穿，从绝缘状态转变为导电状态（见气体击穿理论）。



气体中电流密度 J 与电场强度 E 的关系

qiti jichuan lilun

气体击穿理论 (theory of electric breakdown of gases) 解释气体击穿现象的理论。在气体间隙上施加电压及紫外线等高能辐照时，可以观察到流过间隙的微小电流。当电压增加时，电流也随着增加，直到某一饱和电流值。当电压再增加时，电流又较快地上升，达到汤森（Townsend）放电阶段。当电压再升高到某一临界值时，电压的微小增大，会引起电流骤然剧增，此时气体间隙丧失其电气绝缘性能而变为导电通道，这就是气体间隙的击穿现象。这个临界电压值称为击穿电压。在气体间隙发生击穿后，即使没有外辐照源，间隙中的放电电流也会持续下去，即达到自持放电的阶段。根据外回路的条件，自持放电可以发展成辉光放电、电弧放电或火花放电等形式。

对气体击穿现象的解释有两种相互补充的重要理论：汤森放电理论和流注放电理论。汤森放电理论认为气体间隙中发生的电子碰撞电离及阴极上发生的二次发射过程是气体间隙击穿的主要机制。汤森放电理论适合于低气压以及低 pd 值（气压 p 与间隙距离 d 的乘积）的情况。流注放电理论认为除电子碰撞电离之外，由电子崩头部空间电荷引起的电场畸变以及间隙中的光电离在击穿过程中也起着重要作用。流注放电理论适合于较高的 pd 值。

根据气体间隙的气压高低、电极结构形状以及外加电源种类的不同，发展了相应的特定情况下的气体击穿理论，如高压力气体击穿理论、不均匀电场中的击穿理论、高频击穿理论、真空击穿理论、长空气间隙击穿理论以及沿面放电理论等。

qiti jueyuan jinshu fengbi kaiguan shebei jueyuan shiyan

气体绝缘金属封闭开关设备绝缘试验 (insulation test for gas insulated metal-enclosed switchgear) 对气体绝缘金属封闭开关设备（简称为 GIS）进行的绝缘性能检查试验。主要包括绝缘电阻测量、耐压试验、局部放电试验。图1所示为 1100kV 气体绝缘金属封闭开关。



图1 1100kV 气体绝缘金属封闭开关
（额定电压 1100kV，额定电流 6300A，额定短路开断电流 50kA）

绝缘电阻测量 用 2500V 兆欧表测量其绝缘电阻，一般在整体组装完毕，而 SF_6 气体未充入前进行。

耐压试验 与其他电力设备不同，在 GIS 的现场试验中必须进行耐压试验，以检查其在出厂、运输和安装过程中是否混入导电杂质，部件有无位移或者装配不良等现象，避免因绝缘水平下降而在运行中造成事故。一般认为耐压试验可在交流电压下进行，它不仅可发现内部污染（如导电微粒），还可对 GIS 作老炼试验。耐压试验的时间通常为

1min，可采用逐级升压方式，即从较低电压开始，每级电压停留一段时间；若发生击穿，则可降低或去掉电压，进行分析后再重复进行，目的是对GIS做老炼试验，以消除一些可自行恢复的缺陷。由于GIS的电容量较大，如采用工频试验变压器作为高压电源来进行试验，则变压器的容量很大，在现场试验时很不方便。故多使用串联谐振装置，尤其合适的是采用变频式串联谐振装置作为高压电源进行试验。其原理接线如图2所示。变频电源的频率可在50～300Hz间调节，以便在不同试品容量下，回路均能发生谐振。这类装置的优点是设备重量轻，噪声小，固定电抗器的设计制造容易。试验表明，在上述频率范围内的耐压试验与工频耐压试验的结果是一致的。

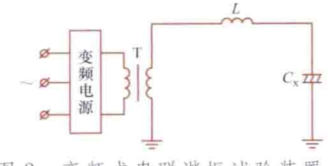


图2　变频式串联谐振试验装置
T—供电变压器；L—电感；
C_x—试品电容

此外，还可进行冲击耐压试验。振荡操作冲击耐压试验对发现污染和不正常电场结构均比较有效，适合于较高额定电压设备的耐压试验。试验可利用振荡操作冲击电压发生器进行，其原理接线和波形如图3所示。振荡频率可用250Hz或低于2.5kHz。

局部放电试验　GIS在最高运行电压下，其内部不应发生局部放电。除在工厂需进行局部放电试验外，最好在现场试验时配合工频耐压试验同时检测其局部放电情况。GIS的局部放电一般采用加速度传感器来检测。其工作原理是通过检测局部放电引起的GIS壳体的微弱振动来实现对局部放电的测量。该试验可以检测出放电量为数十皮库至数百皮库的微弱放电。

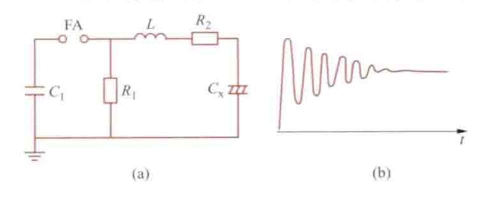


图3　振荡操作冲击电压发生器
(a) 原理接线图；(b) 振荡操作冲击电压波形

qianyilü

迁移率　(mobility)　单位电场强度下，载流子的平均漂移速度，以μ表示。在外加电场作用下，半导体中的载流子除了作无规则的热运动外，将沿电场方向（空穴）或反电场方向（电子）作定向漂移运动，构成漂移电流。迁移率又具体分电子迁移率μ_n和空穴迁移率μ_p两种。各种半导体μ的数值范围为$10^2\sim10^5\mathrm{cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}}$。半导体的电导率为$\sigma=nq\mu_n+pq\mu_p$，式中$q$是电子电荷；$n$和$p$分别是电子和空穴浓度。可见迁移率是反映载流子漂移运动快慢（即其导电能力）的参数。晶体管在工作时，半导体中存在着非平衡载流子的浓度梯度，载流子的扩散运动将构成扩散电流，总电流是它与漂移电流之和。扩散系数D和μ之间遵守爱因斯坦关系式$D/\mu=kT/q$，即$\mu\propto D$。μ愈大，载流子的漂移和扩散运动就愈快。这样，μ决定了晶体管在高频情况下使用的极限。由于$\mu_n>\mu_p$，因此NPN晶体管比PNP晶体管适用的频率更高，N沟道MOS器件比P沟道MOS器件速度更快。砷化钾（GaAs）的迁移率比硅（Si）的迁移率高得多，因而砷化钾（GaAs）更适合制造超高频器件。

杂质离子、各种晶格缺陷以及晶格原子的热振动等，破坏了半导体理想晶格的周期性势场，使得载流子在运动过程中不断地遭到散射，因此，μ值受掺杂浓度、晶体缺陷和温度等因素的影响较大。室温下，μ值随杂质浓度的增加而降低。在半导体材料和器件生产过程中，体内和表面层的迁移率是需要在线检测的重要参数之一。

qianhan cailiao

钎焊材料　(brazing and soldering materials)　制作钎焊所需的钎料及钎剂的材料。钎焊是实现金属间或金属与陶瓷间连接的一种低温连接方法。钎焊的特点是，在焊接时钎料熔化而被焊材料（母材）不熔化。钎焊材料包括钎料和钎剂或可控气氛两大类材料。

钎料　其熔点应低于被焊材料，具有润湿母材及与母材牢固结合的能力，以及能保证钎焊接头服役所需要的各种性能。钎料一般以其熔点450℃为界，分为熔点低于450℃的软钎料和高于450℃的硬钎料。这两类钎料均由各种有色金属及其合金组成。

以熔点低和工艺性优良为特点的锡铅钎料是连接导线和印刷电路元件最常用的软钎料。选用时应对其中杂质元素（铜、铁、锌、铝、砷等）的含量严加控制，以防虚焊。

低熔点的金基钎料用于半导体硅片的钎焊，有金硅、金锗、金铟、金镓和金锡等。

铜锡磷和铜锡镍两种代替银基钎料的铜基非晶态钎料，应用于触头钎焊中。制造这两种钎料时，采用激冷技术，使液态钎料迅速凝固为厚度不大于0.05mm的箔片，而其显微结构呈非晶态或微晶结构。

钎焊各类钢件的硬钎料除银基钎料外，还可用各种铜基钎料，它们主要是纯铜和具有不同含锌量的铜锌合金。

钎焊纯铜时，广泛使用一种低成本的含磷5%～9%的铜磷钎料。它是一种自钎剂钎料，用它钎焊铜导体时可不用钎剂。钎焊铜及其合金如黄铜时，银基钎料是另一种应用十分广泛的硬钎料。它是以银铜合金为基，为了获得不同的熔点，可在其中添加不同量的锌、镉元素。但是对于真空钎焊或要作真空处理或在真空中工作的钎焊接头，不能使用含锌和镉的银基钎料，应选用饱和蒸气压力低的锡和铟来替代锌和镉。

钎焊铝导线时宜采用铝硅共晶钎料和铅铜硅钎料，以保证铝导线接头的耐蚀性。

生产电真空器件时，为了分级钎焊的需要，已研制成功金铜、金镍等高熔点的金基钎料和纯银钎料。连接难熔金属钨、钼时，需使用铜镍钎料。为了在真空中钎焊金属和陶瓷，宜选用铜锗钎料。

钎剂　其功能是保护焊接区免受氧化，清除钎焊时不可避免会产生各种金属氧化物，并且减小钎料在液态时的表面张力，以改善钎料的工艺性。

钎剂由无机酸（如盐酸、氢氟酸和磷酸等）、无机盐（重金属的氯化物、碱金属和碱土金属的氯化物与氟化物）和氧化物（硼酸和硼砂、松香和各种弱有机酸）组成。

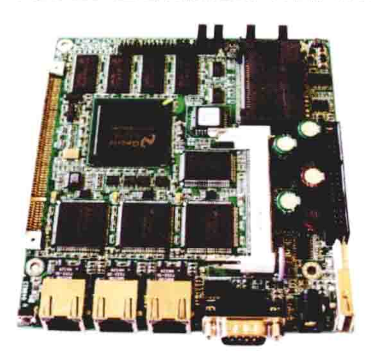
可控气氛　供钎焊时使用，是钎剂的替代物。它可分为三类：惰性气体（氩、氮、氦），活性气体（氢和一氧化碳）及真空。采用可控气氛钎焊时，可使钎焊件不被氧化，保证

金属的光泽。

qianrushi xitong

嵌入式系统 (embedded system) 以应用为中心，以计算机技术为基础，软件硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统，控制、监视或者辅助装置、机器和设备运行。

第一个现代嵌入式系统是麻省理工学院仪器研究室的查尔斯·斯塔克·德雷珀开发的阿波罗导航计算机。Intel4004是第一款微处理器，它在计算器和其他小型系统中找到了用武之地。但它仍然需要外部存储设备和外部支持芯片。到了20世纪80年代末期，微处理器已经出现在几乎所有的电子设备中。嵌入式系统一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统、特定的应用程序组成(见图)。



ARM芯片嵌入系统

嵌入式微处理器 包括最初的4位处理器，目前仍在大规模应用的8位处理器，到受到广泛青睐的32位、64位嵌入式处理器。

外围硬件设备 负责系统对外交流，根据微处理器指令采集信息，输出信息等。

嵌入式操作系统 (embedded operation system, EOS) 一种用途广泛的系统软件，EOS负责嵌入系统的全部软、硬件资源的分配、任务调度，控制、协调并发活动。它必须体现其所在系统的特征，能够通过装卸某些模块来达到系统所要求的功能。

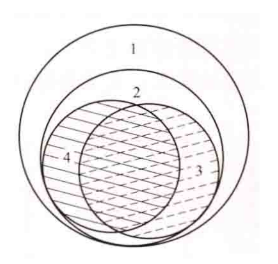
特定的应用程序 即特定用户对于系统的特殊要求而编写的应用程序，旨在利用嵌入式系统的硬件功能和嵌入式操作系统的能力来完成特定的任务。

嵌入式系统的应用领域包括工业控制、交通管理、信息家电、家庭智能管理系统、POS网络及电子商务、环境工程与自然、机器人等。

qingbao jiansuo

情报检索 (information retrieval) 指按某种体系结构把情报组织成情报集合存储起来，再从情报集合中查找出符合特定需要的情报的过程，全称是情报存储与检索，也称广义的情报检索。狭义的情报检索仅指从具有一定体系结构的情报集合中查找出符合特定需要的情报的过程。

情报与信息、知识和文献密切相关。信息是一种十分广泛的概念，在自然界、人类社会以及人类思维活动中普遍存在，不同事物有着不同特征，这些特征通过一定的物质形式(声波、电磁和图像等)给人带来某种信息；知识是人类社会实践经验和认识的总结，是人的主观世界对于客观世界的概括和如实反映，是信息的一部分；情报是传递着的有特定效用的知识，具有知识性、传递性和效用性三个基本属性；文献是用文字、图形、符号、声频、视频等技术手段记录人类知识的一种载体，不仅包括图书、期刊、会议文献、科技报告、专利文献、学位论文、科技档案等传统出版物，甚至包括用声音、图像以及其他手段记录知识的现代出版物。信息、知识、情报和文献四者关系如图所示。



信息、知识、情报和文献四者关系
1—信息；2—知识；3—文献；4—情报

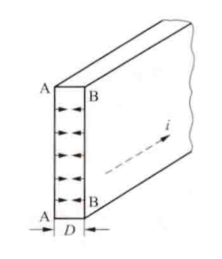
类型 情报检索根据检索(查找)对象的不同，可分为文献检索、事实检索和数据检索。①文献检索。情报以文献(包括题录、文献或全文)形式存储，检索的结果是情报集合中直接存储着的、与检索课题相关的文献或文献题录、摘要。文献检索又可分为手工检索和计算机检索两种类型，手工检索是基础，计算机检索是发展方向。②数据检索。情报以数据形式存储，检索的结果是情报集合中直接存储着的、满足检索课题要求的确定的数据。这里所说的数据是广义的数据，即能够由计算机处理的数字、字母和符号等。③事实检索(亦称事项检索)。情报以事实形式存储，检索的结果是通过逻辑比较、推理、运算等处理得出的、满足检索课题要求的、并非一定是情报集合中直接存储着的确定的事实。这里所说的事实也是一种广义的数据。

计算机情报检索 情报检索一词由C. N. 莫尔(C. N. Mooers)在1950年最先提出，随着计算机等现代技术的发展，出现了利用计算机实现的情报检索，计算机情报检索已经历了脱机检索、联机检索和网络化检索三个发展阶段。①脱机检索。由专职计算机情报检索员，按一定的格式，将检索课题(通常是若干个课题集中在一起)成批地输入计算机进行处理，从存储在计算机内的数据库(即情报集合)中查找出符合需要的情报，而情报用户并不直接与数据库和存储着数据库的计算机发生关系。②联机检索。情报用户可利用终端，直接与被访问的数据库和存储着数据库的计算机进行通信，实现会话式检索。③网络化检索。情报用户可以利用终端，在远离被访问数据库及存储着数据库的计算机的任何地方，通过通信网络(包括公用电话网络、专用通信网络、公用数据交换网络或卫星通信系统等)，实现联机检索。世界上著名的情报检索系统有美国的洛克德公司的DIALOG、系统发展公司的ORBIT，以及欧洲航天局的ESA-IRS等，这些联机网络情报检索系统的检索终端跨越国界，遍布世界各地，所以联机网络检索也就有了国际联机检索的称呼，与手工情报检索相比，解决了情报检索快、准、全的问题。

qufu xiaoying

趋肤效应 (skin effect) 交变电流通过导体或交变磁通穿过导体时，由于电磁感应引起导体截面上电流、磁通不均匀分布，并且愈接近导体表面电流密度、磁通密度愈大的现象。以下仅以电流为例说明。趋肤效应使电流集中分布在导线表面处，使得导线的有效截面变小，导线的等效电阻增大。在工程中，为减弱趋肤效应的影响，常用多股细导线代替单股粗导线制作线圈。

对于扁矩形截面长直导线，当通以高频正弦电流 i 时，电流密度或磁场强度等场量将沿深度方向衰减，即从图中左、右两侧表面 A、B 处沿实线箭头方向衰减。此时可引入趋肤深度 d 来表示趋肤效应的强弱，它等于导体表面场量衰减至 36.79%（即 $1/e \approx 1/2.7183$）的深度。趋肤深度 d 愈小，表示趋肤效应愈强。若导体片的宽度 $D \gg d$，则在大于距表面 $4d$ 的导体内部，几乎没有电流，使导体的利用率降低。通常位移电流可忽略时



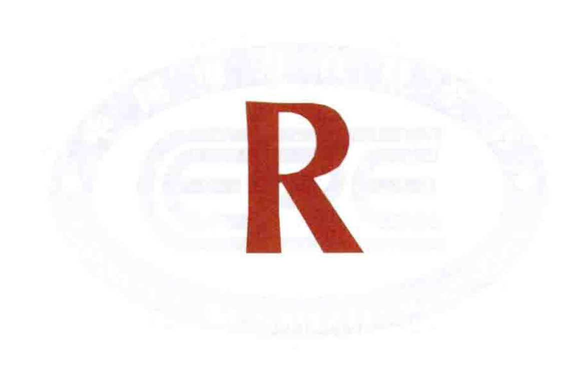
扁矩形截面长直导线

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} \quad (\omega = 2\pi f)$$

式中 ω 和 f 分别为正弦电流的角频率和频率；μ 和 γ 分别为导线的磁导率和电导率。ω、μ、γ 愈大，趋肤深度 d 愈小。对于铜导线，$\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m，$\gamma = 5.8 \times 10^{7}$ S/m，若 $f = 50$Hz 时，$d = 9.35$mm；但当 $f = 500$kHz 时，$d = 0.094$mm。对于圆截面长直导线，场量沿深度方向的衰减规律比较复杂。但若频率很高，仍可将圆导线近似地看成扁矩形截面导线，采用上述趋肤深度公式近似地估算。

quanxiangying

全响应 (complete response) 线性电路或系统在激励作用下产生的零状态响应与在初始储能作用下产生的零输入响应之和。它是电路或系统在激励和初始储能条件共同作用下的响应。



RC zhengxianbo zhendangqi

RC 正弦波振荡器 (RC sine-wave oscillator) 用电阻 R 和电容 C 构成选频网络作为反馈电路的反馈型正弦波振荡电路。典型的 RC 振荡器有文氏电桥式振荡器和移相式振荡器。它们适用于产生 1Hz 到 1MHz 的低频振荡，故常称低频振荡器。频率稳定度约为 10^{-3} 或更低。

文氏电桥式振荡器 由放大电路和文氏电桥反馈电路组成，如图 1 所示。放大电路由集成运算放大器组成的同相比例放大电路构成，反馈电路由 R_1、C_1、R_2、C_2 串并联网路组成。它在某一频率时，选频网络相移为零，则放大电路与反馈网络共同构成正反馈。R_1、C_1 串联支路，R_2、C_2 并联支路和负反馈电阻 R_f、R 构成电桥的四个桥臂，因而称为文氏电桥式振荡器。$\underline{U}_o$ 为输出电压。

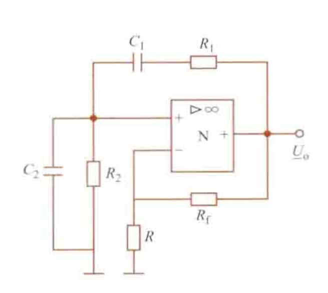


图 1 文式电桥式振荡器原理电路图

RC 选频网络的选频特性：当 $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2})$ 时，反馈系数（见反馈放大器）$|\underline{F}| = 1/3$，$\varphi_F = 0°$。因此，当放大电路的电压放大倍数 $|\underline{A}| = 3$，$\varphi_A = 0°$时，正好构成正反馈电路，满足振荡所要求的振幅平衡和相位平衡两个条件，形成自激振荡。电路的振荡频率即为 f_0。当$R_1 = R_2 = R$，$C_1 = C_2 = C$ 时，$f_0 = 1/2\pi RC$ 。为了得到频率可调的正弦波振荡，可用双连电位器或双连电容器同时改变R_1 和R_2 或C_1 和C_2。

文氏电桥式振荡器的起振条件为 $|\underline{A}| > 3$。

为了使放大电路工作在线性区，减少输出波形的失真，电路中采用非线性元件，例如用负温度系数的热敏电阻作 R_f。在起振过程中，由于 $|\underline{A}| > 3$，输出电压的幅值将逐渐由小到大，此时，R_f的阻值也将随温度增大而减小，而 $|\underline{A}|$ 将下降，直至 $|\underline{A}| = 3$ 时，输出电压幅值稳定在一个合适的数值上。非线性元件也可以是晶体二极管、稳压管、钨丝灯泡、场效应晶体管等。

移相式振荡器 它的反馈电路由三级 RC 移相电路组成，每级 RC 的相移可位于 0°到 90°之间。对某一频率，三级串接的总相移可达 180°。放大电路由集成运算放大器组成的反相比例放大电路构成，如图 2 所示。$\underline{U}_o$ 为输出电压。移相电路和放大电路各自移相 180°，正好构成正反馈，产生自激振荡。移相式振荡器电路简单，但输出波形差，频率调整不方便，频率稳定性及幅度稳定性较差。适用于固定频率场合。常用于轻便型测试设备和遥控设备中。

振荡频率 f_0：当 $C_1 = C_2 = C_3 = C$，$R_1 = R_2 = R'_3 = R$ 时，$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{6}RC)$。式中 $R'_3 = R_3 // R_4$（见图 2）。

起振条件：放大电路的电压放大倍数必须满足 $|\underline{A}| \geqslant 29$。

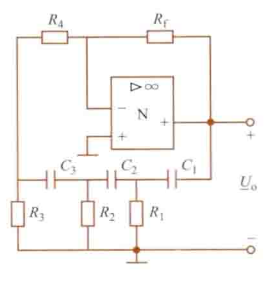


图 2 移相式振荡器原理电路图

reguxing suliao

热固性塑料 (thermosetting plastic) 一种受热后能获得不熔和不溶特性的塑料。原因是受热时发生固化反应。可用加热、催化剂、交联剂或固化剂、辐照等方法进行固化。热固性塑料共有 9 类：三聚氰胺甲醛塑料、酚醛类塑料、环氧树脂类、不饱和聚酯类、有机硅模塑料、呋喃树脂、聚二苯醚、热固性聚丁二烯树脂和聚苯。

（1）氨基类中的三聚氰胺甲醛塑料。质硬、耐电弧，以纤维填充时使用温度范围为−57～121℃，可制成电器零件，特别适宜作开关设备的灭弧室。

（2）酚醛类塑料。机械强度和耐热性较好，可制成模压绝缘制品。

（3）环氧树脂类。用胺类、酸酐类、酰胺类等固化剂固化，可与填料、增塑剂等混合得到软的或硬的制品。可浇注成型，收缩程度小，尺寸稳定性好，可浇注成高绝缘性零件、器件，如变压器、互感器、开关设备零件、电缆终端盒或接头盒等。还可用于电气绕组组件的浸渍密封、浸渍层连接片（环氧玻璃钢）等。环氧树脂种类很多，主要有双酚-A/环氧氯丙烷型，另外，还有能提高耐热性能的线型甲酚甲醛型，能提高电性能的线型酚醛型，以及可提高耐气候性能的脂环型。

（4）不饱和聚酯类。包括醇酸与烯丙酯两类。用苯乙烯化聚酯树脂与玻璃纤维预混成团状物，也可以用醇酸树脂或苯二酸烯丙酯单体为基体形成面团模塑料或黏稠模塑料，可制作互感器、电气零件等。其性能近似环氧树脂，可加温或室温固化，但价格较环氧树脂低。

（5）有机硅模塑料。可耐−70～310℃温度，憎水性强，电性能好，但黏接力不及环氧树脂，一般加有玻璃纤维或矿物填料，用作电气电子零件和高温结构件。

（6）呋喃树脂。耐化学药品及耐热性优于酚醛和聚酯类，可用于户外，可制成水管、风道、泵件和热交换器等。

（7）聚二苯醚。耐热性好，长期使用温度为 180℃，短期为 250～350℃，耐腐蚀，耐辐照，耐氟利昂，具有自熄性、高机械强度和优良的电性能，可作 H 级耐热绝缘材料和耐腐蚀电气零件。

（8）热固性聚丁二烯树脂。具有坚韧性好、挠曲强度高、硬度高、吸湿性低、耐化学药品性能及电气绝缘性能好等优点。其机械强度相当于环氧树脂，热变形温度达 260℃以上，可作涂料或助剂用。

（9）聚苯。其特点是热稳定性好，具有耐高温、耐腐蚀、耐辐照及耐磨等优点。分子量一般较低。具有高结晶

性。可用于制作离子交换树脂、有机半导体等。

热固性塑料所用热固性树脂一般采用缩聚法合成，在固化过程中往往释放出低分子产物。可采用模压、浇铸、嵌铸、灌注、熔敷及层压等方法进行加工成型。上述9种塑料中，在电力工程中应用广而多的一类是环氧类。脂环族环氧是为获得低黏度、耐气候、耐电痕、高耐热环氧树脂而发展起来的新品种。

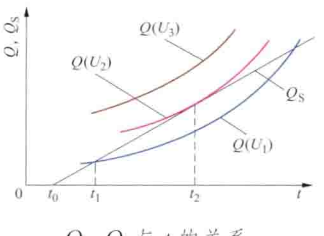
rejichuan

热击穿 (thermal breakdown)

在电场作用下，固体电介质因内部热量积累、温度过高而导致的由绝缘状态突变为良导电状态的过程。热击穿是固体电介质击穿的一种。

实际绝缘结构中，除了导体中电流产生的热量将传送给固体电介质外，在电场作用下，固体电介质本身也将因漏导和极化而发热。与此同时，固体电介质也要向四周散发热量，若发热量超过散热量，则固体电介质的温度将上升。由于固体电介质的介质损耗随温度上升而增加，因此发热量也随之增加。相应地，散热量也随固体电介质与周围环境温差的增加而增加。若在固体电介质能耐受的温度下，发热量与散热量相等，则建立起了热平衡，固体电介质正常工作；若发热量始终大于散热量，则固体电介质的温度不断上升，最终固体电介质发生碳化、熔化或开裂等现象，丧失绝缘性能，发生热击穿。

固体电介质的发热量 Q 与电压 U 及温度 t 有关，散热量 Q_S 与温差 $t-t_0$（t_0 为周围环境温度）有关，如图所示，图中 $U_3>U_2>U_1$。当电压为 U_3 时，发热量始终大于散热量，不能建立热平衡，必然发生热击穿。在电压为 U_1、温度为 t_1 时建立起了稳定的热平衡，不会发生热击穿。当电压为 U_2 时，虽然在温度为 t_2 时能建立起热平衡，但不稳定；温度略有升高，发热量即大于散热量，最终仍然发生热击穿。电压 U_2 是发生热击穿的临界电压。



Q、Q_S 与 t 的关系

影响热击穿电压的因素有：①周围环境温度。热击穿电压随周围环境温度上升而显著下降。②散热条件。加强散热可提高热击穿电压。③固体电介质的厚度。电介质厚度增加后散热困难，用加厚绝缘的方法来提高热击穿电压是不经济的，有时甚至是不可能的。④电压频率。频率越高，发热量越大，热击穿电压越低。⑤固体电介质本身特性。固体电介质的导热性越好，漏导和极化损耗及它们的温度系数越低，热击穿越不易发生。

reshidian cailiao

热释电材料 (pyroelectric materials)

具有自发极化特性且当温度均匀变化时表面会荷电的电介质。自发极化是指由于物质本身的结构在某个方向上正负电荷不重合而固有的极化。自发极化只能出现在晶体的某几个特定晶向上。由于晶体温度均匀变化引起其表面荷电的现象称为热释电效应，其原因在于热释电晶体存在自发极化，其表面束缚电荷被晶体外部和内部的异号自由电荷所屏蔽，晶体不表现带电性质，当温度变化引起正、负离子相对位移、离子键的键长和键角发生改变，导致自发极化强度发生变化时，对外就产生热释电效应。晶体的这一性质称为热释电性。因此，晶体的热释电性实际上是由于温度和熵等热学量与电场强度和电位移（或极化强度）等电学量之间的耦合效应造成。

很早就在电气石［(Na、Ca)(Mg、Fe)$_3$B$_3$Al$_6$(O、OH、F)$_{31}$］上观察到热释电效应，后来陆续发现了很多热释电材料，如硫酸三甘肽（TGS）等。

已知的热释电材料有上千种，但只研究了其中约10%，而实用的不过十多种。主要有硫酸三甘肽（TGS）、锆钛酸铅镧（PLZT）、钛酸铅（$PbTiO_3$）和聚合物薄膜（PVF_2）等。

热释电材料主要是用来探测红外辐射，已经广泛使用在各类辐射计、光谱仪、红外激光的探测和热成像管等方面。热释电材料用得最多的是TGS晶体，它具有大面积宽频率范围内灵敏度高的优点。PLZT和 $PbTiO_3$ 应用在红外探测器上有相当大的潜力。

resuxing suliao

热塑性塑料 (thermoplastics)

在特定温度范围内能反复地加热软化、冷却变硬，且在软化时能重复流动成型和能溶于一定溶剂中的一种塑料。若在有些热塑性塑料中加入交联剂或用辐照等处理，则也能转变为热固性塑料。

热塑性塑料有九大类：乙烯基类、聚烯烃类、苯乙烯类、纤维素类、丙烯酸酯类、酰胺类、含氟塑料类、聚醚酯类和聚芳杂环类。

（1）乙烯基类。用量最大，以聚氯乙烯为代表，它是白色粉状树脂，以不同比例与增塑剂、稳定剂、填料、着色剂、润滑剂等混合后，可制成软质及硬质（无增塑剂）材料或制品。糊状树脂可作涂料等用。硬质制品长期使用温度通常为60℃；软质制品，因配方与工艺而异，约为60～150℃。软聚氯乙烯大量用于低压电力电缆、控制电缆的绝缘材料和护套材料，并可制成绝缘带。

（2）聚烯烃类。用量也很大，以聚乙烯和聚丙烯为代表。聚乙烯为乳白色透明塑料，外观似石蜡，性坚韧，稍具延伸性，电气绝缘性能优良。有低密度、中密度、高密度、线性低密度和超高分子量聚乙烯之分，密度增加，则杨氏模量、拉伸强度、硬度、伸长率降低。线性低密度聚乙烯能兼顾两方面性能，而超高分子量聚乙烯则具有较高的机械强度、硬度。长期使用温度视配方及工艺而异，为60～90℃。低密度聚乙烯可用作电力电缆绝缘，高密度聚乙烯用作电线绝缘。交联聚乙烯因其具有更优良的电气、力学、耐热性能，已在高压、超高压电力电缆绝缘中广泛应用，但也存在使用后难以降解带来的环境问题。图所示为电力电缆。聚丙烯在一般塑料中相对密度最轻（0.90），耐温120℃，刚性好，耐弯折，电气绝缘性能好，可用于电力电容器中。


电力电缆

（3）苯乙烯类。以聚苯乙烯为代表，其吸水率低，尺寸稳定性好，电气绝缘性能优良，易加工，制品透明，但力学性能差，易脆裂，不宜户外使用，耐温 76～93℃，可用作电气绝缘零件、线圈骨架等。还可与其他单体共聚得到多种改性塑料合金，从而大大改善力学性能，用作结构材料。

（4）纤维素类。以醋酸纤维素塑料为代表。乙酰化度高的醋酸纤维素塑料耐水性好，可用作电绝缘制品。

（5）丙烯酸酯类。以聚甲基丙烯酸酯为代表，俗称有机玻璃，透光性及耐气候性好，力学及电气绝缘性能一般，可用作仪器仪表外壳或面板。

（6）酰胺类。俗称尼龙。机械强度高，电气绝缘性能一般，易吸水，尺寸稳定性差，用玻璃纤维增强后，力学性能、耐热性及尺寸稳定性可得到改善。尼龙 66 和尼龙 610 可用作绝缘零件；尼龙 11、12 及 612 可用作电线电缆护套。

（7）含氟塑料类。以聚四氟乙烯和聚全氟乙丙烯为代表。耐热性很高，电气绝缘性能优良，可用作电线电缆绝缘，也用作套管和电流互感器绝缘。

（8）聚醚酯类。以聚对苯二甲酸乙二酯为代表，可制成双轴取向拉伸薄膜，电绝缘性和机械强度高，在电机、电容器等方面应用广泛。耐热性更高的还有聚碳酸酯、聚对苯二甲酸丁二酯等。

（9）聚芳杂环类。以聚酰亚胺为代表，具有突出的耐高温、耐低温和耐辐照特性，且具有优良的机械性能和电气绝缘性能。用于宇航领域作为绝缘零件、电线包覆层等。

热塑性塑料加工成型方便、生产效率高，特别是可以用挤出、压延、吹塑、注射等高效加工工艺成型，其应用范围十分广阔。发展方向是采用不同材料进行复合、共混，以达到改善性能、降低成本的目的。

rengong shenjing wangluo

人工神经网络

（artificial neural network，ANN） 由称为神经元的基本处理单元互连而成的平行工作的复杂网络系统，简称神经网络。它的工作机制类似于生物神经系统，但绝不是神经系统的结构仿真，仅是功能上的抽象和模拟。

神经网络的基本工作原理：每个神经元是由一个计算单元构成，该单元具有多个输入和单个输出。其功能是对各个输入信号作非线性权值运算，并通过输出端输出至其他神经元。整个网络工作过程分为训练和求解两个阶段。当已知训练样本的数据加到网络输入端时，网络的学习机制一遍又一遍地调整各神经元的权值，使其输出端达到预定的目标。这就是训练（学习、记忆）过程。当经过训练的网络进行问题求解时，输入的求解信号在网络内迅速地传递、处理。当网络达到稳定状态时，从输出端即可得到问题的解。

互连方式是神经网络的关键，可以通过神经元的权值变化进行动态调整。网络的记忆容量取决于互连数目。工作速度由每秒钟信号传递的互连数目来表示。与传统的计算机相比较，神经网络具有工作上大规模的平行性，知识的分布性，功能上的容错性和结构上的自组织性等特点，因而适用于语音、图像等感知问题的求解及生产过程的控制。

神经网络按其构造形式可分为单层和多层两大类：①单层神经网络。输入层直接与输出层相连接。其特点为结构简单，便于实现，如霍普菲尔德（hopfield）网。②多层神经网络。输入层和输出层之间存在一层或多层中间层（称为隐藏层）。隐藏层的出现使网络工作机理复杂化，但功能加强，如反向传播（back propagation，BP）模型。

神经网络出现于 20 世纪 40 年代。在 50～60 年代曾得到一定的发展。其后受到 M. 明斯基（M. Minsky）等人所发表的《感知机》一文的否定而处于低谷。直到 20 世纪 80 年代由于大规模集成电路的高速发展等原因才又一次引起了科技界的广泛兴趣。20 世纪 90 年代，人工神经网络的研究受到了重视。神经网络计算机已有产品。网络的工程实现（新型元件、结构模式）及生物神经网络的机理深入探索仍是需要重点突破的两个方面。由于神经网络显示出新型智能结构及智能行为，它已成为神经生理学、心理学及计算机科学等许多学科综合性研究的领域，它与模糊系统、遗传算法、进化机制等结合，形成计算智能，成为人工智能的一个重要方面，它的发展将对人工智能、认知心理及生物神经机制研究具有重要的意义。

rengong zhineng

人工智能

（artificial intelligence，AI） 研究理解智能行为并构造具有这种智能能力的计算机系统的一门学科。

学科内容 可概括为智能的研究和工程性的研究两个方面。

智能的研究 人类表现有智能行为的活动有：问题求解、符号表达、语言、感知、学习和创造等。人工智能具有基础学科探索的一面，它与研究这些现象的其他学科如心理学、语言学和哲学等的差别在于：它是利用计算机来进行实验模拟和研究。当提出一种关于揭示某种智能活动的新设想时，它是通过构造一个程序来进行考察和试验的。知识表示和搜索技术是 AI 的两大支柱。

（1）知识表示。知识是事实、认识以及启发性规则，是人通过实践，认识到的客观世界的规律性的表述，是经过加工整理、筛选的信息。知识表示是研究知识从自然记载形式过渡到适合计算机处理的表示形式，是一种数据结构与控制结构的统一体，既考虑知识存储，又考虑知识的使用。知识表示的方法有多种，有演绎系统、产生式系统、框架系统、语义网络和过程性知识表示等。

（2）搜索技术。搜索又称查找，是一种查询数据、信息的方法，目的在于以较少的时间与步骤找到所需对象。搜索技术涉及无信息导引的盲目搜索和利用经验知识导引的启发式搜索以及博弈树搜索、状态空间搜索、问题空间搜索等多个方面。

工程性的研究 人工智能具有工程学科的一面，它要构造一些计算机应用系统，能够实现原来需要具有人的智能才能够完成的各种任务，得以更好地为人类服务。主要的应用领域有游戏、机器定理证明和逻辑推理、知识工程、专家系统、自然语言理解、计算机视觉、人工神经网络、机器学习、智能机器人和智能控制。

（1）游戏。如下棋。好的计算机下棋程序已可使计算机与世界级棋手相匹敌。1997 年 5 月 IBM 深蓝计算机战胜了国际象棋冠军。

（2）机器定理证明和逻辑推理。利用计算机进行自动推理，已成为AI许多分支中一个公共的重要技术。

（3）知识工程。

（4）专家系统。

（5）自然语言理解。使计算机能懂得人的语言（声音的或文字的）含义，能将人的意思由计算机用人的声音或文字语言表达出来，也包括不同语种之间的翻译。

（6）计算机视觉。使计算机从所接收到的景象中辨认其特殊目标、特性和模式并进一步对景象进行理解，即用符号描述它以供计算机处理。

（7）人工神经网络。

（8）机器学习。主要有归纳学习、分析学习、连接机制学习和遗传学习等，用来获取新知识。

（9）智能机器人和智能控制。在生产中应用着的机器人大都由电子控制器或计算机按照预先编制好的程序来控制其动作。一方面，智能机器人运用了人工智能技术，只要给定了目标任务，它就可以自行规划行动的细节；另一方面，每当其工作环境发生异常的变化时，它就能够自行采取相应的调整措施来适应其变化。这种自治的技术用于自动控制系统，即为智能控制。

兴起、发展与演变 20世纪40年代后半期，在计算机的发明上作出过卓越理论贡献的一些学者如A. M. 图灵（A. M. Turing）、J. 冯·诺依曼（John Von Neumann）和C. E. 香农（C. E. Shannon）等都对于计算机除了数值计算外，还对能否使它进行思考、学习和自己修复故障等智能性活动作了探讨，并作出了肯定的预测。

到20世纪50年代中期，有些科学家们开始着手实现人工智能的目标。在1956年，十名美国科学家，其中包括J. 麦卡锡（John McCarthy）、M. 明斯基（Marvin Minsky）、A. 纽厄尔（Allen Newell）和H. 西蒙（Herbent Simon），在达特莫斯（Dartmouth）学院举行了一个讨论会，首先提出了“人工智能”这个术语，并开始了人工智能的研究。

20世纪60年代，人工智能研究出现了高潮。J. 麦卡锡发表的符号处理语言原型，提供了用计算机程序设计作为人工智能符号处理的基础。H. 西蒙夫妇做了一个有趣的心理学实验，表明人类求解问题是一个搜索过程，其效率取决于启发式函数。在此基础上，研制了通用问题求解系统、启发式搜索算法A^*、机器定理证明过程中的归结原理及其完备性的证明等成果。

20世纪60年代末，E. A. 费根鲍姆（E. A. Feigenbaum）等提出了第一个专家系统DENDRAL，用于分析化学分子式结构。到70年代专家系统取得极大成功。20世纪80年代，霍普费尔德（Hopfield）和D. 罗密尔赫塔（D. Rumelhart）等人对人工神经网络的研究，解决了M. 明斯基所提出的感知器不能解决高阶谓词问题，随着出现了连接机制研究神经网络的热潮，推动了人工智能研究的进展。这样，符号机制和连接机制成为研究人工智能的主要观点。80年代后期，人工智能引入其他学科的思想和研究成果，出现了一些引人注目的新方法。例如，利用类似生物遗传的遗传算法来发现新的规则。

20世纪90年代以来，对人工神经网络的知识表示、常识推理、机器学习和分布式人工智能等基础性研究取得了可喜的进展。

进入21世纪，人工智能在数学机械化、机器学习、自动推理、时间和空间知识表示和推理、自然语言处理、智能诊断和智能规划、Agent技术及应用、计算智能、大规模知识处理、电子商务应用方面取得了一系列成果，人工智能与其他学科的交叉研究产生了计算机辅助艺术和动画、基于知识的软件工程、数据挖掘和知识发现、网络智能等新的研究领域。

人工智能能否发展到可以匹敌自然智能（人类智能）的地步是一个颇有争议的问题，一些学者建议把人工智能和自然智能结合起来，形成威力更大的智能组合。

renji jiaohu jishu

人机交互技术

（human-computer interaction technology，HCI technology） 研究人与计算机之间各种符号和动作的双向信息交换的技术。它主要包括人到计算机和计算机到人这两部分的信息交换。对于前者，人们可以借助键盘、鼠标、操纵杆、数据手套、数据衣、位置跟踪器、眼动跟踪器等设备，用手、脚、声音、姿势或身体的动作、视线甚至脑电波等向计算机输入信息。对于后者，计算机通过打印机、绘图仪、显示器、头盔式显示器（head mounted display，HMD）、音箱等输出或显示设备向人们提供可理解的信息。人机交互技术极大地促进了计算机的快速发展与普及，在制造业、教育、娱乐、军事和日常生活等领域得到了广泛应用。

发展阶段 计算机系统中的人机交互技术随着计算机技术和通信技术的发展而发展，经历了从“以机器为中心”到“以人为中心”的发展过程，其发展过程包括三个阶段：命令行界面交互阶段、图形用户界面交互阶段和自然和谐的人机交互阶段。

（1）命令行界面交互阶段。计算机的使用者主要通过键盘输入数据和命令信息，界面输出以字符为主。显然，这种人机交互方式缺乏自然性。

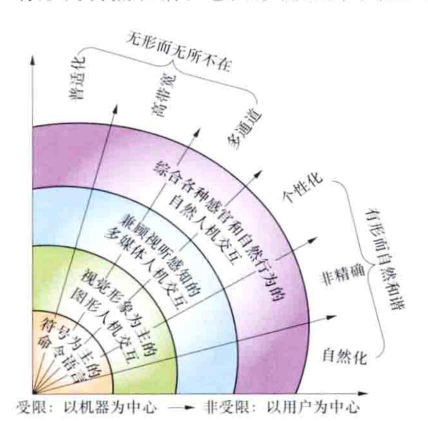
（2）图形用户界面（graphics user interface，GUI）交互阶段。GUI的出现使人机交互方式发生了巨大的变化。GUI的主要特点是使用桌面隐喻WIMP（Windows、Icon、Menu、Pointer）技术、直接操纵和所见即所得。与命令行界面相比，GUI的自然性和交互效率都有较大的提高，使得普通用户也可以熟练地使用计算机。

（3）自然和谐的人机交互阶段。这个阶段的特点是充分利用和协调人的多种感觉通道和效应通道，如语音、手写、姿势、视线、表情等输入，以并行、非精确的方式与可见或不可见的计算机环境进行交互，从而进一步提高人机交互的自然性和高效性。

研究内容 ①人机交互界面表示模型与设计方法；②可用性分析与评估；③多通道交互技术；④认知与智能用户界面；⑤群件；⑥Web设计；⑦移动界面设计。人机交互技术与认知心理学、人机工程学、多媒体技术、虚拟现实技术等密切相关。其中，认知心理学和人机工程学是人机交互技术的理论基础，而多媒体技术和虚拟现实技术与人机交互技术是相互交叉和渗透的。

发展趋势 虚拟现实、移动计算、云计算和普适计算等技术的飞速发展对人机交互技术提出了新的挑战和更高的要求，同时也为人机交互技术的发展注入了新的动力。主流的“以机器为中心”的“受限”（formal），GUI/WIMP界面正

遭受不断的批评，“以用户为中心”“非受限”（informal）的自然、高效、无障碍多通道的感知用户界面（perceptual user interface，PUI）是新型人机交互的主要发展目标。如图所示，这种趋势可以概括为两大特性：无形而无所不在和有形而自然和谐。①无形而无所不在。许多计算机装置将会变得“不可见”，计算也会变得无所不在，不可见的人机交互也会无处不在。未来的人机交互将是嵌入了多种感知和计算设备的物理空间，人们能够在任何时间、任何地点用更高效的多通道方式与任何具有计算装置的机器进行操控、通信和交流。②有形而自然和谐。传统的图形界面事实上成为隔离物质世界和信息世界之间的屏障。虚拟现实、网络计算、智能代理和软件机器人、计算机支持的协同工作等技术的应用，将实现“虚物实化”和“实物虚化”，消除物理对象和抽象对象、输入装置和输出装置在交互空间中的差别，并为人提供多感觉通道的自然临境体验。语音及文字识别和自然语言理解等语言计算，手写体和手绘草图识别等笔式计算，手势和表情识别、视觉—目标拾取认知技术等视觉计算等技术的不断发展和完善，将不断提高人机交互的智能化程度。未来的人机交互技术将能模拟多种智能和真实环境的虚拟空间，人们能够在任何时间、任何地点与任何需要的环境（包括人）以最自然和“身临其境”的方式来完成所需要完成的工作。



人机交互技术的发展趋势

rongfu fenmo cailiao

熔敷粉末材料 （powder for coating） 由合成树脂、固化剂、填料和其他成分配制成的一种热固型固体粉末状绝缘材料。可以把它看作固体粉末状绝缘漆类。其特点是：在高于树脂熔化温度下能均匀地涂覆在工件表面，形成厚度均匀、平整光滑、黏结紧密的绝缘层。这种绝缘层导热性好、耐潮、耐腐蚀，可车削加工，应用方便，工艺简单。主要用于微电机铁芯槽绝缘和导线绝缘涂敷，也可以用于小型变压器、电器外壳和无线电元件的涂封等。电气绝缘熔敷粉末所用的合成树脂主要是环氧树脂和聚酯树脂。这两类树脂的工艺性能、深层附着力、电气绝缘性能较好，成本较低。环氧熔敷粉末的主要品种有普通高温粉末、高温弹性环氧粉末和低温环氧粉末。B级的聚酯改性环氧粉末和F级的聚酯粉末也是常用的品种。应用熔敷粉末加工工件，多采用流化床或静电喷涂等工艺方法。

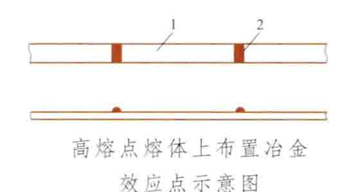
rongti cailiao

熔体材料 （materials of fuse elements） 制作熔断器的熔体及熔丝的材料。熔体材料可分为低熔点熔体材料和高熔点熔体材料两大类。低熔点熔体材料多数是选用按特殊比例组成的低熔点合金，也可用低熔点纯金属。高熔点材料一般均选用纯金属。

低熔点熔体材料　低熔点纯金属主要有铅（327℃）、锡（232℃）、镉（321℃）、铟（156℃）和铋（271℃）等。用这些材料可组成低熔点合金，最常用的是铅锡合金，成分为70%铅和30%锡，常用于分断小电流，制作熔丝及小功率工业设备和家用电器的保护熔断器的熔体。此外，锡铋铅镉铟合金（赛璐合金）、锡铋铅合金（牛顿合金）、铋锡合金（赛切路合金）等都是典型的低熔点合金。

高熔点熔体材料　按熔点高低排列次序为铜（1083℃）、银（961℃）、铝（660℃）。铜熔体容易氧化，性能不稳定，只能用于对过载分断电流和分断速度要求不严格的场合。银熔体性能稳定，固态电阻率低，能用于制造体积小而分断电流大的熔断器。银熔体的熔点和熔化潜热低于铜，汽化点和汽化潜热低于铜和铝，熔化后它的液态电阻温度系数高于铜和铝，因此熔化后能迅速汽化，达到快速分断的目的，是较理想的熔体材料。银是贵金属，有些国家已开始转向以铝熔体代替银熔体。铝的主要缺点是固态电阻率偏高，使熔体体积增大；熔点低而汽化点高，使分断速度降低。铝表面的氧化薄膜有保护作用，因此铝熔体性能也较稳定。

利用冶金效应可使高熔点熔体的熔点降低，制造出过载分断电流大而准确的快速熔断器。具体做法举例如下：将低熔点金属（例如锡）黏附在高熔点熔体（例如银）的某点，或相隔一定距离的某几点上，如图所示。当过载电流通过熔体时，低熔点金属锡开始熔化，并与银熔体产生冶金共熔作用，大约在345℃（约为银熔点温度的36%）即能使此点全部熔化，达到产生电弧和分断电路的目的。



高熔点熔体上布置冶金效应点示意图
1—银熔体；2—锡点

特殊熔体材料　利用金属钠汽化温度低（885℃）、质软易变形等特点可制成自复熔断器的熔体。当线路过载时，钠迅速发热汽化而断路。当故障排除后，钠蒸气很快凝聚，适当施加外力即能复原。

跌落式高压熔断器的熔体通常是银铜合金丝，银和铜的比例是4∶6。

ruanci cailiao

软磁材料 （magnetically soft materials） 具有低矫顽力的磁性材料，亦称高导磁材料。在电力工业中用于制造电机、变压器等电器设备的铁芯。在电子工业中用于制造各种磁性元件，广泛应用于电视、广播和通信等方面。这类材料具有饱和磁通密度高，磁导率高，磁滞回线呈狭长形、面积小，磁滞损耗小，剩磁及矫顽力小等特性。用于交流场合时要求涡流损耗及磁滞损耗小。常用的有纯铁、低碳钢、硅钢片、坡莫合金、铁氧体等。

（1）纯铁、低碳钢：磁导率高、加工性能好。但涡流损耗大，只宜用于直流铁芯。

（2）硅钢片、硅钢带：电阻率高，涡流损耗小。但质脆、加工性能差。片状叠合或卷成环状使用，片间浸绝缘漆或形成氧化层以减小涡流损耗。

(3) 坡莫合金：铁镍合金的统称，具有很高的磁导率。用于精密仪表、记录磁头等或要求体积小的场合。

(4) 铁氧体：以 Fe_2O_3 为主要成分，掺和 Mn－Zn 或 Ni－Zn 等，用粉末冶金法压制成锰锌铁氧体或镍锌铁氧体，其电阻率高，高频损耗小，前者用于 1MHz 以下，后者用于微波频率。工作频率越高则其磁导率越低。铁氧体属于亚铁磁性材料，磁导率低于铁磁材料。

ruanjisuan

软计算 (soft computing) 一类与人脑相对应的、适于在不确定性和不精确环境中进行学习和推理的计算方法。它是多种方法的协作和结合，包括人工神经网络、模糊逻辑以及一些非导数优化算法，如遗传算法和模拟退火等。通过将这些方法进行协作和结合，可以使计算能更有效地利用人类的知识来处理不确定性和不精确环境下的学习和推理问题。

1992 年，Loft A Zadeh 教授研究了人工神经网络、模糊逻辑以及遗传算法与传统计算模式的区别，并将它们命名为软计算。近年来，人们也将混沌理论、粗糙集、模拟退火算法等都归入到软计算的范畴。构成软计算的三个主要元素：模糊逻辑、人工神经网络和进化计算。其中，模糊逻辑是建立在模糊集合基础上的处理不确定知识和进行近似推理的主要方法；人工神经网络由于具有良好的自学习、自适应和自组织能力及大规模并行、分布式信息存储和处理的特点，适合解决那些无法建立精确模型且同时需要考虑多个因素的、不精确的信息处理问题；以遗传算法为代表的进化计算、进化策略和进化规划等方法则是计算机科学和生物遗传学相互结合渗透而形成的一类优化方法，它们基于 Darwin 的进化论和 Mendel 的遗传学说，能够采用简单的编码技术来表示各种复杂的结构，并通过对交叉、变异等遗传操作和优胜劣汰的自然选择来指导学习和确定优化搜索的方向。

ruanjian gongcheng

软件工程 (software engineering) 用工程方法与工程途径研制、维护和管理软件的过程和技术。

产生背景 软件的研制、维护和管理是工程性任务，而软件技术到 20 世纪 60 年代中期，还是处于类似于“手艺”阶段而不是工程化的方式。于是出现了对软件质和量方面的高需求与生产率低、可靠性差之间的突出矛盾，即产生了所谓“软件危机”。面对这种情况，开始考虑用工程的方法和途径来研制、维护和管理软件，以保证质量，降低成本，提高生产率。1968 年提出了软件工程概念。

基本内容 软件工程研究的内容主要有软件生存周期、软件研制和维护的方法与技术、软件工具和软件支撑环境、质量保证和质量评价、软件管理、计算机辅助软件工程、面向对象的软件工程、基于构件的软件工程、软件测试、软件过程管理、应用 Web 工程、软件工程经济学等。

软件生存周期 软件产品从形成概念开始，经过开发、使用和不断增补修订，直至最后被淘汰的整个过程。一个软件产品的生存周期可划分成若干个互相区别而又有联系的阶段。每一阶段的工作均以前一阶段工作的结果为依据，并作为下一阶段工作的前提。软件生存周期可划分为七个阶段：制订计划、需求分析、概要设计、详细设计、实现、测试、使用与维护。①制订计划阶段：确定系统的功能、性能、约束、接口和可靠性，估算系统的成本和工作量，安排开发进度。②需求分析阶段：描述和确定用户的要求，是研制软件的基础和依据，需求定义技术在软件工程中占有重要地位。③概要设计阶段：软件设计阶段把需求定义“翻译”成软件的一种表示形式。其概要设计是根据软件需求、信息流和信息结构以构造各组成模块之间的关系。④详细设计阶段：进一步把模块元素变成详细的过程描述，以提供给软件实现阶段进行具体的编程。⑤实现阶段：将软件的详细设计转换成用程序设计语言表示的程序代码或用软件工具自动生成程序代码。⑥测试阶段：通过精心选择的测试数据，观察程序执行的结果是否与预期的结果相符。测试工作能发现程序中存在的一部分错误，提高程序正常工作的置信度，但不能据此证明程序的正确性。⑦使用与维护阶段：通过了测试的程序中仍可能有遗留的错误，将在运行和维护阶段解决。维护可分为校正性维护、适应性维护、完善性维护和预防性维护。

软件工具和软件支撑环境 软件工具指的是软件生产过程中所使用的软件，软件支撑环境是用于支撑其他软件研制和维护的一组软件。早期的软件工具仅能支撑实现编程、测试阶段的某些工作。完备的软件支撑环境应为软件工程所有各阶段工作提供适当的整体化的环境，包括环境数据库、软件工具组、接口软件等。

质量保证和质量评价 评价软件质量的指标包括可靠性、效率、易使用性、易维护性、易移植性等。①可靠性：指在一定的时间内软件在多次执行中不失败的概率。②效率：指包括时间、空间等所有系统资源的有效利用程度。③易使用性：表示系统能提供良好的用户界面，用户易学易用。④易维护性：包括易理解性、易修改性和易测试性。易理解性表示研制的软件易为研制者及他人所理解；易修改性表示容易修正、更新和扩充软件系统；易测试性是指便于测试一个程序的执行过程以寻找遗留的错误。⑤易移植性：指易于将软件从一种环境移植到另一种环境。

质量评价是研究如何对软件质量的各种特性指标进行评价，它涉及质量管理、质量认证和质量审核等一系列内容。

软件管理 软件研制和维护过程的管理，包括进度管理、成本管理、质量管理、人员管理、标准化管理等。基本目的是在给定的研制和维护费用及工程限期内，研制出符合用户要求的软件系统。软件管理贯穿于软件工程各个阶段。

计算机辅助软件工程 (computer-aided software engineering, CASE) 软件工具和软件方法的结合，它强调了解决整个软件开发过程的效率问题。由于跨越了软件生存期的各个阶段，因而 CASE 也是一种最完满的软件技术。CASE 着眼于软件分析、设计、程序实现和维护的自动化，从软件生存期的两端解决了软件生产率的问题。

面向对象的软件工程 (object oriented software engineering, OOSE) 用对象、对象关系来构造软件问题模型。其中，对象由属性和操作组成。对象类是具有相似属性和操作的一组对象总称。一旦定义了一个类，它就形成建模、设计和实现等各活动可复用的基础。OOSE 不同于面向对象编程 (object oriented programming, OOP)。在一个系统开发过程中是只采用 OOP 还是采用 OOSE 方法，关键看整个开发过程是

“设计主导”还是“程序主导”。

基于构件的软件工程（component-based software engineering，CBSE）包括两个并发的子过程：领域工程和基于构件的开发。领域工程的意图是标识、构造、分类和传播特定应用领域中的一组软件构件。基于构件的开发对这些构件进行鉴定、适应性修改和集成以将其用于新应用中。此外，基于构件的开发将基于新系统的特别需求来开发新构件。

构件指的是软件系统中可以明确标识的构成成分，而可复用构件指的是具有相对独立功能和复用价值的构件。可复用构件封装了它的设计和实现，仅向外部提供接口，是相对独立的可重用软件单元。

软件测试　保证软件质量的重要活动，也是软件开发过程中占有最大百分比的技术工作。软件测试的目的是为了发现错误，为此，需要进行一系列的测试活动：单元测试、集成测试、确认测试和系统测试。单元测试是检查每个程序模块是否正确地实现了规定的功能；集成测试是将经过单元测试的模块组装起来进行测试；确认测试是检查软件是否满足软件需求规格说明中确定的各种需求以及软件配置是否完全、正确；系统测试则是把软件纳入实际运行环境中，与其他系统元素一起进行测试。

软件过程管理　软件过程是为建造高质量软件所需要完成的任务的框架，框架中每一个活动由一组软件工程动作组成，每一个动作都包括一系列相互关联的任务并产生一个关键的工作产品，通用过程框架包括沟通、策划、建模、构建和部署。软件过程对改善软件质量，控制软件组织的性能起到非常重要的作用。

由美国卡内基—梅隆大学软件工程研究所发布的软件过程成熟度模型（capability maturity model，CMM）侧重于软件开发过程的管理及工程能力的提高与评估，是国际上流行的软件生产过程标准和软件企业成熟度等级认证标准。CMM的目标是通过软件生产过程，实现高效率、高质量、低成本的软件开发。CMM把软件过程从无序到有序的进化过程分成有序的5个等级，1级为初始级，2级为可重复级，3级为已定义级，4级为已管理级，5级为优化级，每个等级的过程能力将作为达到下一更高等级的基础，成熟度不断升级的过程就是其过程能力逐步积累的过程。CMM在个体和小组软件过程水平上的应用称为个体软件过程（personal software process，PSP）和团队软件过程（team software process，TSP）。

应用Web工程　借用软件工程的基本概念和原理，强调与软件工程相似的技术和管理活动，用来创建高质量Web应用软件（web applications，WebApp）的工程。Web工程（web engineering，WebE）工作中最常见的应用类型包括信息型、下载型、可定制型、交互型、用户输入型、面向事务型、面向服务型、门户型、数据库访问型和数据仓库型。WebE可以被描述成三层——过程、方法、工具和技术。WebE过程采用敏捷开发思想，表现为快速的开发周期，而且通常是增量化的工程化方法。WebApp不断演化，因而必须建立配置控制、质量保证及运行支持机制。

软件工程经济学　从经济学的观点来研究、分析如何有效地开发、发布软件产品和支持用户使用这一产品的学科。软件工程经济学研究的问题包括：①成本估算技术与成本估算模型的建立和使用；②软件工程中不同决策的“成本—效益”分析；③多目标决策分析；④不确定性的处理和风险分析；⑤工期估计和控制。

发展趋势　早期主要围绕软件工程过程，开展了有关软件生产技术和软件生产管理的研究与实践。20世纪90年代以来，软件工程的研究开始从过程（管理）向产品（开发）过渡，更加注重新的开发模型和生产技术的研究，软件重用和软件构件技术、中间件、分布式计算、标准化、智能化、软件可靠性工程以及自动化的CASE研究成为软件工程的热点。进入21世纪，随着网络软件工程的发展，物联网、云计算等新技术将对软件工程及软件产业的发展带来深远影响。



Smalltalk yuyan

Smalltalk 语言 (Smalltalk) 见程序设计语言。

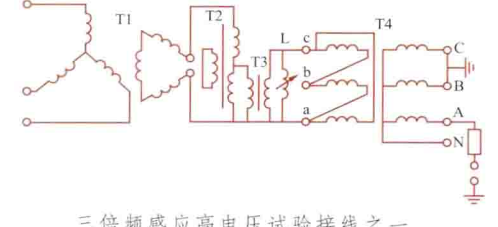
sanbeipin shiyan zhuangzhi

三倍频试验装置 (AC testing equipment with triple power-frequency) 变压器类试品在150Hz频率下进行感应耐压试验的电源装置。电力变压器和电压互感器在大修更换绝缘之后，或新变压器在变电站安装之后，为了考验它们的匝间、层间、段间纵绝缘以及中性点半绝缘变压器的主绝缘，常需进行现场感应耐压试验。对于电压为220kV及以上的电力变压器，还需在升高一定倍数的额定相电压下进行局部放电量的测量。上述两类试验的试验电压比额定电压高。为了避免被试变压器励磁电流增大，感应加压时，升高电源频率是必要的。频率值可为50Hz的倍数，如100、150、200、250Hz等。现场试验较多采用150Hz，因为除了有条件使用倍频发电机或变频电源之外，经常采用3台单相变压器组成三倍频试验装置作为试验电源。

根据变压器的基本原理，当3台单相变压器一次侧接成星形，二次侧接成开口三角形时，在一次侧施加较大的励磁电流，使铁芯饱和，在二次侧开口三角形的两端便可获得三倍于电源频率的电压。因为铁芯饱和后，铁芯内磁通含有三次谐波分量，在各相的二次绕组便感应出相应的三次谐波电动势分量 $\boldsymbol{E}_3$。三次谐波电动势在三个相绕组里是同相的，所以开口三角形绕组端子上会出现一个等于 $3\boldsymbol{E}_3$ 的电压。此时基波电动势由于三相的相位互差120°，三相电动势的相量和为零，故二次侧仅输出三倍频的电压。

上述方法所产生的电压不可能很高，而且电压还需要调节，所以要经过调压器和升压变压器加到被试变压器的低压侧，然后利用被试变压器自感在其高压侧获得一定的高电压。

图示出了电力变压器进行三倍频感应耐压试验的接线图例。图中以被试变压器试验A相绕组的绝缘为例，此时B、C两相绕组用于产生“支撑电压”。



三倍频感应高电压试验接线之一
T1—三倍频发生器；T2—调压器；T3—升压变压器；T4—被试变压器

额定电压220kV及以上的电力变压器进行感应耐压试验时，大多呈现较大的电容性负载，为此常如图所示并接一个补偿电感 L，它可以由消弧线圈、空载或短路变压器、电抗器等构成。三倍频试验装置在开口三角侧输出功率的功率因数应补偿到大于或等于0.8。

试验前应对试验设备的容量进行估算。试验时要分别通过互感器监视各处的电压和电流值，以免超过试验设备的容量和产生过电压，并注意防止铁磁谐振过电压的产生。被试点的电压一般通过电容分压器测量。在无风及湿度不大的条件下，可以用铜球来限制过电压。

为进行被试变压器局部放电量的测试而专门设计制作的三倍频试验装置，除应满足试验容量的要求外，其本身的局部放电量也应限制在一定值内。

与倍频发电机相比，上述的三倍频试验装置的优点是：主设备由三台单相变压器和一台调压器组成，装卸相对比较容易；由于是静止电器，工作时噪声不大，稳定可靠，维护容易。其缺点是：过励磁太甚时，波形含有九次谐波分量；一般情况下，不如倍频发电机产生的波形符合标准要求。

sanxiang dianlu gonglü

三相电路功率 (power of three-phase circuit) 三相电路的总功率。它等于各相功率的总和。三相电路有对称三相电路和不对称三相电路之分；功率有平均功率（即有功功率）、无功功率和视在功率之分。

不对称三相电路功率

平均功率

$$P=P_A+P_B+P_C$$
$$=U_{PA}I_{PA}\cos\varphi_A+U_{PB}I_{PB}\cos\varphi_B+U_{PC}I_{PC}\cos\varphi_C$$

无功功率

$$Q=Q_A+Q_B+Q_C$$
$$=U_{PA}I_{PA}\sin\varphi_A+U_{PB}I_{PB}\sin\varphi_B+U_{PC}I_{PC}\sin\varphi_C$$

视在功率

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}$$

式中 φ_A、φ_B、φ_C 分别是A相、B相和C相负载的阻抗角，下标“P”表示“相”。P_A 为A相负载平均功率；Q_A 为A相负载的无功功率；U_{PA} 为A相相电压；I_{PA} 为A相相电流，余类推。

对称三相电路功率

平均功率 $P=3U_PI_P\cos\varphi=\sqrt{3}U_lI_l\cos\varphi$

无功功率 $Q=3U_PI_P\sin\varphi=\sqrt{3}U_lI_l\sin\varphi$

视在功率 $S=\sqrt{P^2+Q^2}=3U_PI_P=\sqrt{3}U_lI_l$

式中 φ 是每相负载的阻抗角，下标“l”表示“线”。这种情况下，三相负载的功率因数：$P/S=\cos\varphi$。

三相负载的瞬时功率 等于三相中各相负载瞬时功率的总和。设对称三相负载的A相相电压的初相角为零，A相、B相和C相的瞬时功率分别为

$$p_A=u_{PA}i_{PA}=\sqrt{2}U_P\cos\omega t\,\sqrt{2}I_P\cos(\omega t-\varphi)$$
$$=U_PI_P\cos\varphi+U_PI_P\cos(2\omega t-\varphi)$$

$$p_B=u_{PB}i_{PB}$$
$$=\sqrt{2}U_P\cos(\omega t-120°)\sqrt{2}I_P\cos(\omega t-120°-\varphi)$$
$$=U_PI_P\cos\varphi+U_PI_P\cos(2\omega t-240°-\varphi)$$

$p_C = u_{PC} i_{PC}$

$= \sqrt{2}U_P\cos(\omega t - 240°)\sqrt{2}I_P\cos(\omega t - 240° - \varphi)$

$= U_P I_P \cos\varphi + U_P I_P \cos(2\omega t + 240° - \varphi)$

三相负载的瞬时功率 $p = p_A + p_B + p_C = 3U_P I_P\cos\varphi = P$。可见，对称三相电路中三相负载的瞬时功率是一个与时间无关的定值，就等于平均功率 P。若负载是三相电动机，因为它的瞬时功率不随时间改变，瞬时转矩是恒定的，电动机运行平稳。这正是对称三相电路的一个优点。三相瞬时功率为恒定的三相制叫做平衡三相制。

sanxiang dianyuan

三相电源 (three-phase sources) 能同时提供三个频率相同而初相位互异的电源。三相发电机就是一种常用的三相电源。

三相同步发电机的工作原理 图1是两极三相同步发电机的示意图。其中，AX、BY 和 CZ 是三个完全一样而空间位置彼此间隔 120° 的定子绕组，分别称为 A 相、B 相和 C 相绕组。设 A、B、C 是各绕组的始端，X、Y、Z 是各绕组的末端。直流电流通过转子绕组，转子被磁化成一对磁极。当转子以角速度 ω 匀速作顺时针旋转时，在相绕组 AX、BY 和 CZ 中分别感应出正弦电动势 e_A、e_B 和 e_C，它们分别称为 A 相、B 相和 C 相电动势。这一组三相电动势的振幅（或有效值）相同，角频率均为 ω。若规定每一相电动势的参考方向都是由相绕组的末端指向始端，则在相位上 e_B 要比 e_A 滞后 120°，e_C 又比 e_B 滞后 120°。三相电动势的瞬时值的表示式为

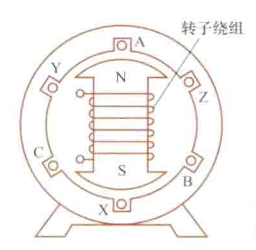


图1 两极三相同步发电机示意图

$$e_A = \sqrt{2}E\cos\omega t,\ e_B = \sqrt{2}E\cos(\omega t - 120°),$$
$$e_C = \sqrt{2}E\cos(\omega t - 240°)$$

它们的相量表示式为

$$\underline{E}_A = E\angle 0°,\ \underline{E}_B = E\angle -120°,\ \underline{E}_C = E\angle -240°$$

图2（a）和（b）分别是这一组三相电动势的波形图和相量图。

相序 电动势 e_A、e_B 和 e_C 通过具有相同斜率的同一值（例如通过正最大值）的次序。如图2（a）中，最先通过正最大值的是 e_A，其次是 e_B，最后是 e_C，故相序为 A-B-C，称为正序。如果三相电动势通过正最大值的次序 A-C-B，则相序为负序。通常，三相电动势的相序都是正序。

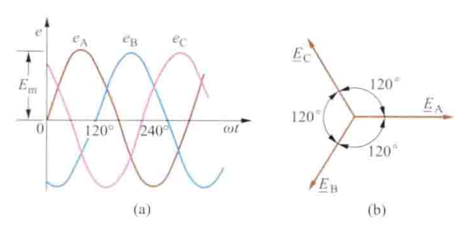


图2 三相电动势的波形图和相量图
（a）波形图；（b）相量图

相绕组的连接方式 三相电源的相绕组有两种基本接法：星形联结（Y形联结）和三角形联结（△形联结）。把三个相绕组的末端连在一起，成为公共节点 N，而始端 A、B、C 则分别与端线相接，这便是星形联结。N 称为电源的中性点，见图3（a）。若将每一相绕组的末端与它紧邻的后一相绕组的始端相连后，再将 A、B、C 分别与端线相接，这就是三角形联结，见图3（b）。

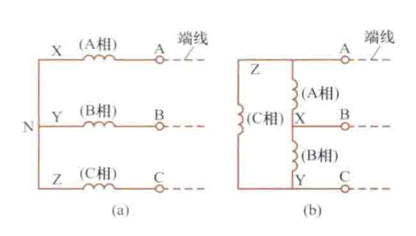


图3 三相电源的连接方式
（a）星形联结；（b）三角形联结

星形联结的三相电源简称为星形电源，三角形联结的三相电源简称为三角形电源。

相绕组中的感应电动势用电压源反映，考虑到相绕组有阻抗，故星形电源和三角形电源的等效电路图如图4（a）、（b）所示。

对称三相电源和不对称三相电源 若三相电源同时满足：①各相电压的有效值（或振幅）相等；②相邻两相的相位互差 120°，则三相电源称为对称三相电源。对称三相电源的三相电压瞬时值之和为零，即 $u_{SA} + u_{SB} + u_{SC} = 0$，若用相量表示则有 $\underline{U}_{SA} + \underline{U}_{SB} + \underline{U}_{SC} = 0$。

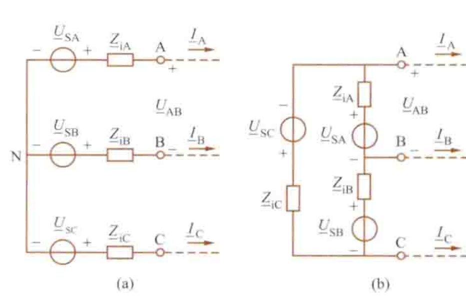


图4 星形电源和三角形电源的等效电路图
（a）星形电源；（b）三角形电源

不能同时满足上述两个条件的三相电源称为不对称三相电源。

sanxiang fuzai

三相负载 (three-phase loads) 连接成三角形或星形由三相电源供电的负载。三相负载分为对称三相负载和不对称三相负载。

对称三相负载和不对称三相负载 将三个相同的二端元件例如三个相同的阻抗接成三角形或星形后，接到三相电源，这三个阻抗就构成对称三相负载。若这三个阻抗不都相等，它们构成不对称三相负载。在图1、图2所示电路中，若阻抗 $\underline{Z}_1$、$\underline{Z}_2$、$\underline{Z}_3$ 满足条件 $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3$，则负载是对称三相负载，否则是不对称三相负载。图2中的 N 点称为星形三相负载的中性点。从电力系统的运行角度，总是希望三相负载是对称的或接近对称的。三相同步电动机或异步电动机是常见的对称三相负载。

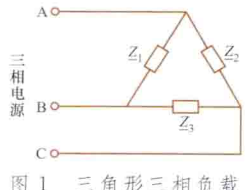


图1 三角形三相负载

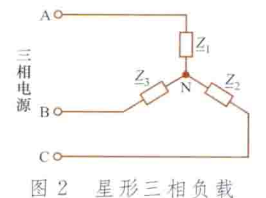


图2 星形三相负载

单相负载 将一个或多个阻抗接在三相电源的两条端线

之间，该阻抗称为单相负载，见图3。单相负载也可以看成是一种特殊的不对称三相负载。电力机车是典型的单相负载。为了保证三相负载达到基本平衡，通常将各单相负载均匀地连接于三相之间。

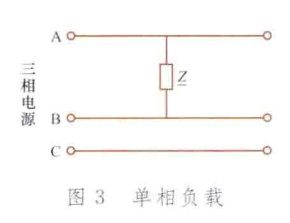


图3　单相负载

sanlie suanfa

散列算法　（hash algorithm）　一种动态建表和查表的算法。采用散列法为集合 U 建立一个大小为 n 的动态查找表 HT 的方法是：构造一个映射 h：$U \xrightarrow{h} (0, 1, \cdots, n-1)$，使得 U 中的任一元素 $a \in U$ 存放在 HT 中序号为 $h(a)$ 的单元中，这样建立的表 HT 称为散列表。散列法常用于 U 较大而 n 较小且动态建表的场合。

散列函数（即映射 h）的构造方法主要有直接定址法、数字分析法、除留余数法、平方取中法和折叠法等。直接定址法：散列地址为关键字的某个线性函数；数字分析法：从关键字中提取分布比较均匀的若干位或它们的组合作为散列地址；除留余数法：散列地址为关键字除某个不大于散列表表长的质数后的余数；平方取中法：散列地址为关键字平方后的中间几位；折叠法：将关键字分割成位数相同的几部分（最后一部分的位数可以不同），然后取这几部分的叠加和（舍去进位）作为散列地址。在构造散列函数时，要尽量使得 U 中的元素能比较均匀地分布在数组中。然而，无论 h 如何构造，都可能会将 U 中不同的元素映射到同一地址从而产生冲突。解决冲突的方法通常有两种：①链地址法：HT 的元素是指向链表的指针，具有相同映射值的元素置于同一地址的链表中；②开放定址法：使用一映射序列，若地址 $h(a)$ 已有元素存在其中，则顺次计算其他映射，直到可存放为止。若整个散列表已存满，再存放元素时就要产生溢出，此时可使用再散列技术把表扩大。

从表中删除元素的过程是建表的逆过程。若要在非链地址处理冲突的散列表中删除一个记录，则需在该记录的位置上填入一个特殊的符号，以免找不到在它之后填入的与它具有相同映射地址的元素。

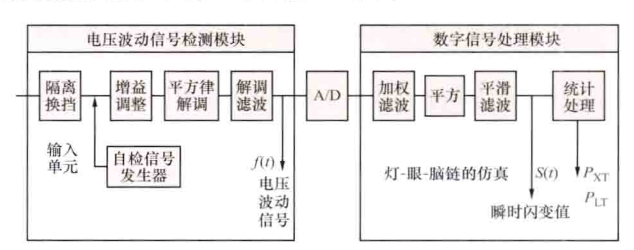
散列表的平均查找长度是装填因子（表中包含的元素与表的长度的比值）的函数，与表长无关，因而比顺序查找和折半查找都小得多。（见查找表）

shanbianyi

闪变仪　（flicker meter）　测量电压波动和电压闪变的仪器。

对闪变，有预测和直接测量两种测量法。预测法只能简单估计一台或多台新启用的电器设备投入运行时供电系统能否接受；当电器设备投入运行后，用预测法已无法确切知晓供电系统中电压闪变的具体值，因此，在供电系统的公共节点处实施直接测量法。

电压闪变通常由电压波动引起，为测量电压闪变，要先测量电压波动，故多种闪变仪均有测量电压波动功能。国际电热协会 UIE 推荐的基于直接测量法构建的电压闪变仪的原理结构如图所示。这种闪变仪由电压波动信号测量和数字信号处理两大功能模块组成。前者主要由硬件电路实现，其中，隔离换挡单元完成供电电网电压与本仪器的隔离、自动换挡，增益调整单元实现被测信号的自动稳幅，平方律解调单元对被测信号先做平方运算，再通过滤波，仅保留直流分量、调幅波频率相关分量、电网基波频率相关分量，再由解调滤波单元滤除直流分量和电网基波频率相关分量后，输出电压波动信号 $f(t)$。该信号再经 A/D 转换后，由数字信号处理模块实现数字视感度加权滤波，模拟照明灯的照度波动对电压波动的频率选择性，又经平方运算，模拟人眼-人脑的非线性感觉，并再经平滑滤波来模拟人脑的存储效应，完成对灯-人眼-人脑链响应特性的仿真模拟，从而得到瞬时闪变视感度 $S(t)$。最后，对$S(t)$进行统计处理，完成对闪变严重程度的估计（P_{XT}）和评定（P_{LT}）。



基于直接测量法构建的电压闪变仪原理结构框图

实用型闪变仪有多种，例如日本的 ΔV10 闪变仪，英国的 ERA 闪变仪和法国的 EDF 闪变仪等。不同类型闪变仪是基于不同闪变值定义的，但所实现的测量原理、基本构成及主要功能等无本质区别。

基于直接测量法制成的闪变仪的主要功能有：①单通道实时测量，适于 380、220、100V 等多个电压等级；②可同时测量电压波动值和闪变值，也可单独测量电压波动值；③可即时测量，也可定时、定次数连续测量；④有自检信号，可随时检查自身工作状态；⑤即时显示并打印输出测量结果；⑥具体测量范围：电压波动 0%～28%（相对于额定值），电压闪变 0%～9.99%（相对于额定值）。

shanluo shiyan

闪络试验　（flashover tests）　对某一绝缘结构按规定的条件和方式施加电压直至在气体或液体电介质中沿绝缘表面发生贯通性放电的试验。闪络可能只引起电气强度的暂时丧失。在压缩空气、六氟化硫等气体和绝缘油中发生沿面放电时（见油中沿面放电），如放电通道深入到固体绝缘内部，绝缘不再是自恢复性的。

闪络试验主要用于绝缘子类产品在空气中进行的试验。按试验时绝缘子表面状况的不同可分为干、湿和污秽闪络试验三种；按施加电压性质的不同可分为直流、工频、雷电冲击和操作冲击闪络试验四种。

（1）绝缘子干闪络试验：在试品干燥和清洁的状态下，按规定条件进行的试验。它是考核户内绝缘子性能的主要试验。对户外绝缘子，也常以工频干闪络试验作为例行试验。

（2）绝缘子湿闪络试验：在试品处于人造雨下，按规定条件进行的试验。它是考核户外绝缘子性能的主要试验。中国国家标准《高电压试验技术》（GB/T 16927.1—2011）对人造雨有如下规定：雨水的电导率应为（100±15）μS/cm

(20℃时)；雨水的温度应为周围环境温度±15℃；试验时在试品上降下均匀的滴状雨；降雨率的垂直与水平分量均为 1.0～2.0mm/min。

(3) 污秽闪络试验：见绝缘子污秽放电试验。

(4) 直流闪络试验：仅用于工作电压为直流的绝缘结构。直流电压下绝缘表面没有明显的滑闪放电现象。当直流电压有很大的脉动或者电压突然有变化时，有可能产生滑闪放电。直流电压下做湿闪络试验时，淋雨表面的不均匀性对闪络电压的影响很大。

(5) 工频闪络试验：最常用的试验。当被试品有极不均匀电场并具有强垂直分量时（例如套管），随电压升高可能出现沿面滑闪放电。绝缘子在淋雨时的工频闪络电压与绝缘子外形尺寸和伞形有密切关系。

(6) 雷电冲击闪络试验：用视在波前时间和视在半峰值时间分别为 1.2μs 和 50μs 的标准雷电冲击电压进行试验。因正极性的闪络电压通常低于负极性的，因此试验多采用正极性冲击电压。雷电冲击闪络电压主要取决于两电极之间的闪络距离，淋雨下的闪络电压和干闪络试验时基本相同。

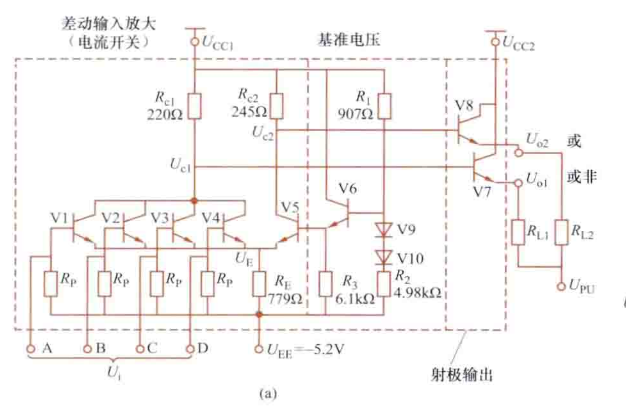
(7) 操作冲击闪络试验：仅对 330kV 及以上的产品或绝缘子串进行这项试验。在大多数情况下正极性的闪络电压低于负极性的，试验多采用正极性的电压进行。操作冲击闪络电压与电压波形有很大关系。标准操作冲击电压的波前时间和半峰值时间分别为 250μs 和 2500μs。操作冲击电压下淋雨状态的闪络电压通常低于干状态下的，下降的程度随绝缘结构、施加波形而异。

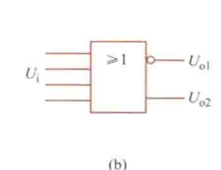
sheji ouhe luojimen

射极耦合逻辑门 (emitter coupled logic gate)

以多个晶体管的发射极相互耦合组成的非饱和型高速集成逻辑门电路，简称 ECL 电路。电路中的晶体管只工作在截止和放大状态，它的开关速度极高，平均传输时间（t_{pd}）约为 1～2ns。

图中为典型的 ECL 或/或非门电路图和图形符号。此电路可按图中的虚线划分为三部分：差动输入放大（电流开关）、基准电压和射极输出电路。





ECL 或/或非门电路

(a) 电路；(b) 图形符号

电路的工作情况如下：取 $U_{EE}=-5.2V$，U_{CC1} 及 U_{CC2} 接地。从 V6 的发射极输出基准电压为 $U_{B5}=-1.3V$，电路输入信号的高电平典型值为 $U_{iH}=-0.92V$，低电平为 $U_{iL}=-1.75V$。图中 U_{PU} 可以与 U_{EE} 取值相同，也可以取不同于 U_{EE} 的数值。

当所有输入全部接低电平时，则 V1～V4 的基极电平都是 −1.75V；而 V5 的基极电平较高为 −1.3V，所以 V5 导通。并且 $U_E=U_{B5}-U_{BE5}=-1.3-0.77=-2.07V$，从而 V1～V5 的发射极电位 U_E 被钳在 −2.07V，此时 V1～V4 的发射结压降只有 0.32V，故 V1～V4 全部截止，U_{C1} 为高电平，U_{C2} 为低电平。

反之，当输入端的任何一个变为高电平，假定 A 为高电平，则 V1 的基极电平为 −0.92V，高于 U_{B5}，V1 导通。在 V1 导通后将有 $U_E=U_i-U_{BE1}=-0.92-0.77=-1.69V$，所以 U_E 被钳在 −1.69V，此时 V5 发射结上的压降仅有 0.4V 左右，故 V5 截止。于是 U_{C1} 为低电平，而 U_{C2} 为高电平。

由于 V1～V4 的发射极和集电极是分别并联到一起的，只要 V1～V4 当中有一个或一个以上的输入为高电平，都会使 U_{C1} 为低电平而 U_{C2} 为高电平。因此，U_{C1} 与输入信号之间的关系为正逻辑的“或非”，U_{C2} 与输入信号之间的关系为正逻辑“或”。

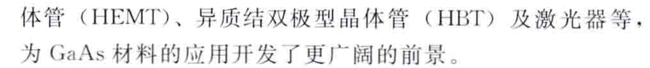
射极输出电路由 V7、V8 管组成。它不仅是电路的驱动器，而且还起电平偏移的作用，以利于与同类门的电平相配合。

ECL 电路的优点是：工作速度快，负载能力强，可实现“线或”逻辑，故在大型、高速计算机中得到了广泛应用。它的缺点是：功耗大，噪声容限低，故抗干扰能力低。

shenhuajia

砷化镓 (gallium arsenide)

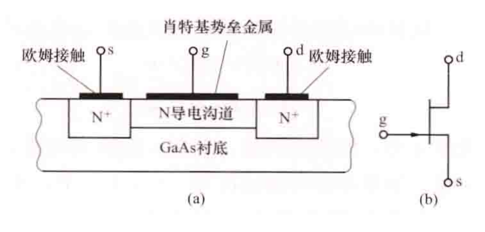
一种化合物半导体材料，分子式 GaAs。立方晶系闪锌矿结构，即由 As 和 Ga 两种原子各自组成面心立方晶格套构而成的复式晶格，其晶格常数是 0.564 19nm。室温下禁带宽度 1.428eV，是直接带隙半导体，熔点 1238℃，质量密度 $5.307g/cm^3$，介电常数 13.18。较纯砷化镓晶体的电子和空穴迁移率分别为 $8000cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$ 和 $100\sim300cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$，少数载流子寿命为 $10^{-2}\sim10^{-3}\mu s$。在其中掺入Ⅵ族元素 Te、Se、S 等或Ⅳ族元素 Si，可获得 N 型半导体，掺入Ⅱ族元素 Be、Zn 等可制得 P 型半导体，掺入 Cr 或提高纯度可制成电阻率高达 $10^7\sim10^8\Omega\cdot cm$ 的半绝缘材料。由于 GaAs 具有很高的电子迁移率，故可用于制备高速或微波半导体器件。砷化镓还用于制作耐高温、抗辐照或低噪声器件，以及近红外发光和激光器件，也用作光电阴极材料等。它是发展超高速半导体集成电路的基础材料。制备 GaAs 单晶的方法有区熔法和液封直拉法。用扩散、离子注入、气相或液相外延及蒸发等方法可制成 PN 结、异质结、肖特基结和欧姆接触等。由于分子束外延和金属有机化学气相沉积（MOCVD）技术的发展，可在 GaAs 单晶衬底上制备异质结和超晶格结构，已用这些结构制成了新型半导体器件如高电子迁移率晶体管（HEMT）、异质结双极型晶体管（HBT）及激光器等，为 GaAs 材料的应用开发了更广阔的前景。



shenhuajia changxiaoying jingtiguan

砷化镓场效应晶体管 (gallium arsenide field-effect transistor) 用砷化镓制造的N沟道场效应半导体器件，又称为金属-半导体场效应晶体管（MESFET）。砷化镓（GaAs）是一种新型半导体材料。它的电子迁移率比硅约大5～10倍。用GaAs制造的有源器件具有比硅器件快得多的转换速度（例如在截止、饱和、导通间变化）。高速砷化镓场效应晶体管被用于微波电路、高频放大和高速数字逻辑电路中。

N沟道MESFET的物理结构和图形符号分别如图所示。图（a）表明，在GaAs衬底上形成N沟道，然后在N沟道两端利用光刻、扩散等工艺掺杂成高浓度N^+区，分别组成漏极d和源极s。当MESFET的栅区金属（例如铝）与N沟道表面接触，将在金属—半导体接触处形成肖特基势垒区，它和硅JFET的栅极、沟道间的PN结相似。MESFET的肖特基势垒区也要求外加反偏电压，u_{GS}愈负，肖特基势垒区愈宽，N沟道有效截面积愈小，因此，漏极电流i_D将随u_{GS}变化，这样，MESFET的输出特性与硅结型场效应晶体管相似。MESFET属于耗尽型器件。



N沟道砷化镓场效应晶体管

（a）物理结构；（b）图形符号

shenjing wangluo kongzhi

神经网络控制 (neural network control) 基于神经网络的智能控制。它是指在控制系统中采用神经网络对难以精确描述的复杂的非线性对象进行建模，或充当控制器，或优化计算，或进行推理，或作故障诊断，以及同时兼有上述某些功能的适当组合。神经网络控制是智能控制的一个主要的分支。也有简称之为神经控制。

神经网络在控制中的作用：①在基于模型的各种控制器中充当对象的模型；②在反馈控制系统中直接充当控制器；③在传统的控制系统中作优化计算；④在与其他控制方法和优化算法，如模糊控制、专家系统控制及模拟进化优化方法（遗传算法等）等相结合中，为其提供非参数化对象模型、优化参数、推理及故障诊断等。

传统的控制方法以受控对象的数学模型为基础，按照对控制系统设定的性能指标来设计控制器，并对控制规律用数学方式解析描述，具有显式表达知识的特点。神经网络不善于显式表达知识，但它有很强的逼近非线性函数的能力，即非线性映射能力。此外，神经网络还具有较强的自学习能力和泛化能力，神经网络在控制中的应用主要就是利用了它的这几种能力。

对于一个单输入单输出的被控对象，设其输入u和输出y具有非线性函数关系$y=f(u)$，控制的目的就是要寻找适当的输入u^*，使系统的输出等于期望的输出y^*。显然，$u^*=f^{-1}(y^*)=g(y^*)$。若函数$f(\cdot)$已知，且可求得$g(\cdot)$，则可容易求得u^*。当$f(\cdot)$未知或虽然已知却难以求得$g(\cdot)$时，可以利用神经网络来模拟$g(\cdot)$，而不论$f(\cdot)$已知与否。要实现这一目标，需要有神经元的激励函数，通常有比例函数、符号函数、饱和函数、双曲函数、阶跃函数、S型函数等；还需要有调整神经元之间的连接权的学习算法，通常有反向传播（back-propagation，BP）算法、Hebb算法、梯度下降法、模拟退火法、遗传算法、免疫算法、群智能算法（蚁群算法和粒子群算法等）等；再需要反映输入和输出之间关系的一些典型的样本。对于多输入多输出系统，神经网络同样适用。

应用于控制的神经网络可分为两大类：静态的非线性映射网络［如BP网络、多层感知器、径向基函数网络（radial basis function，RBF）和小脑模型关节控制器（cerebellar model articulation controller，CMAC）］和动态反馈网络（Hopfield网络等）。在非线性动态系统辨识中，常用BP网络和RBF网络，因其具有逼近任意的非线性函数的能力。在非线性系统的最优控制中，通常采用Hopfield网络及其改进模型。在实时控制中，常用BP网络和CMAC网络。

神经网络在控制中的应用包括下列类型：①监督控制或有导师控制；②PID控制；③直接逆控制；④适应控制；⑤内模控制；⑥预测控制；⑦鲁棒控制；⑧系统辨识；⑨最优决策控制；⑩再励学习控制；⑪增益排队论；⑫滤波和预报。

参考书目

韦巍，何衍．智能控制基础．北京：清华大学出版社，2008.

喻宗泉，喻晗．神经网络控制．西安：西安电子科技大学出版社，2009.

shengci

剩磁 (remanent magnetism) 将铁磁体磁化到饱和状态后再逐渐减小外磁场到零时，铁磁体内所保留的磁通密度，其全称为剩余磁通密度。在磁滞回线上对应于$H=0$，$B=\pm B_r$两点。

剩磁广泛应用于制造永久磁钢（见永磁材料）。但在制造电机、电器铁芯时，应使剩磁尽量小。

剩磁机理　外磁场撤销后，铁磁体内部的磁畴并未恢复到原来（未磁化）的混乱排列状态，导致剩磁。影响剩磁的因素有：温度、机械冲击和时间。

（1）温度。剩磁随温度的上升而减弱，在一定的温度范围内可用剩磁的温度系数来表示。这种温度系数除与材料特性有关外，也和形状尺寸有关。

（2）机械冲击。受冲击会使剩磁减弱，甚至完全消失。原因是强烈的机械震动促使磁畴趋于混乱排列。

（3）时效变化。热运行有使磁畴排列趋于混乱的趋势。特别是刚充磁的材料尚处于亚稳态，剩磁衰退较快，直至过渡到稳态后才转为缓慢衰退。通常以充磁后100s的剩磁和充磁后10s的剩磁的比值，来表示时效变化。

矫顽力　饱和磁滞回线与H轴的交点$\pm H_c$称为矫顽力，是衡量退磁难易程度的物理量。

shimin dianzu cailiao

湿敏电阻材料 (humidity sensitive resistance materials) 对湿度敏感的电阻材料。这些材料具有将湿度这一物理量转换成电信号的功能，它是利用与湿度有关的电阻（或电导）随湿度变化的特性而实现这种功能。

氯化锂是最早发现的湿敏材料。1938 年 F. W. 邓莫尔（F. W. Dunmore）首先制成氯化锂柱状湿敏器件。随后，各种类型的湿敏材料和器件相继问世。但迄今为止，用这些材料制成的湿敏器件，性能都还不太理想。

分类　湿敏电阻材料主要有电解质、有机聚合物和半导体陶瓷三类。电解质材料主要是氯化锂，其感湿性较好、响应时间短，但检测的范围窄、重现性不理想、寿命短。有机聚合物主要有羟乙基纤维素碳湿敏材料和聚苯乙烯磺酸锂等，这种材料的感湿性能好、响应快，但稳定性不好、抗沾污能力弱。半导体陶瓷主要有 Fe_3O_4、$MgCr_2O_4-TiO_2$ 系、$TiO_2-V_2O_5$ 系、$ZnO-Li_2O-V_2O_5$ 系、$ZnO-Cr_2O_3$ 系等，它们的稳定性较好、寿命长、响应时间短、测量范围宽，但材料固有电阻大、测量准确度不高。

应用　氯化锂湿敏器件用于气象探测和高空遥测，量程（15%～95%）RH（RH 表示相对湿度）（多个组合后），工作温度范围为 −40～55℃，准确度为 ±2%RH，灵敏度为 0.25%RH，响应时间为 40s～3min。这种器件不适于低、高湿环境，应避免在 95%RH 以上环境下使用。有机聚合物羟乙基纤维素碳湿敏器件的量程为（0%～100%）RH，工作温度为 −20～80℃，响应时间为 5s～2min，准确度为 ±3%RH，适于在固态换能器中使用。半导体陶瓷湿敏器件有膜型（Fe_3O_4 等）和烧结型（$MgCr_2O_4-TiO_2$ 系等）。Fe_3O_4 湿敏器件体积小、性能较稳定、再现性好，量程为（30%～98%）RH，工作温度为 5～40℃，准确度为 ±6%RH，响应时间为 1～3min，这种器件不可在高温下使用。$MgCr_2O_4-TiO_2$ 湿敏器件体积小，量程（1%～100%）RH，工作温度为 1～150℃，响应时间小于 10s，准确度 ±3%RH，用于自动烤炉、空调机、漏气监控等方面。现有湿敏器件绝大部分都不宜在直流或脉动直流电路中工作，应注意器件的温度特性或对测量电路进行温度补偿。

发展趋势是研制和开发检测寿命长、再现性好、可靠性高的湿敏器件及其材料；发展能在高、低温下检测和控制低、高湿度场所的器件和材料；开发受环境污染影响小的湿度传感器材料。此外，还需发展气-湿、热-湿等多功能敏感电阻材料。

shiying jingti

石英晶体　(quartz crystal)

见晶体振荡器。

shibian diancichang

时变电磁场　(time-varying electromagnetic field)

场量随时间变化的电磁场。电场的场量随时间变化时伴随有磁场，磁场的场量随时间变化时伴随有电场。电场与磁场两者相互依存，互为因果，形成统一的电磁场。静电场或恒定磁场是能够独立存在的，这是静态场和时变场的重要区别。时变电磁场的基本方程组是麦克斯韦方程组。

电磁场的能量　线性介质中电场能量密度 w_e 与磁场能量密度 w_m 分别为

$$w_e=\frac{1}{2}\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{E},\ w_m=\frac{1}{2}\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{H}$$

式中 $\boldsymbol{D}$ 为电通密度；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；$\boldsymbol{B}$ 为磁通密度；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度。在时变电磁场中，它们均随时间而变化，根据能量守恒定律，自然伴随有能量的流动。

坡印亭矢量　$\boldsymbol{S}(\boldsymbol{S}=\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{H})$ 在闭合面 A 上的面积分 $\oint_A \boldsymbol{S}\cdot d\boldsymbol{A}$ 代表单位时间内由该闭合面 A 内向外传播的能量，即能流。坡印亭矢量则代表单位时间内在单位面积上由内向外传播的能量，即能流密度。在无线电工程中常用它来分析天线的辐射能量或辐射功率。

shibian xitong

时变系统　(time-varying system)

状态空间表达式中矩阵 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 和 $\boldsymbol{D}$ 的元素全部或部分是时间 t 的函数的控制系统。

线性连续时变控制系统的状态空间表达式为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}(t)\boldsymbol{u}\end{aligned}\quad t\in[t_0,t_a]\right\}\tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量，$\boldsymbol{u}$ 为 p 维输入向量，$\boldsymbol{y}$ 为 q 维输出向量。如果在所考察的区间 $[t_0,\ t_a]$ 上，$\boldsymbol{A}(t)$、$\boldsymbol{B}(t)$ 和 $\boldsymbol{u}$ 的元素是分段连续的，则状态方程存在唯一解 $\boldsymbol{x}(t)=\Phi(t,t_0)\boldsymbol{x}_0+\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{\Phi}(t,\tau)\boldsymbol{B}(\tau)\boldsymbol{u}(\tau)d\tau$，式中解的第一部分是初始状态 $\boldsymbol{x}_0$ 的转移。解的第二部分是输入的转移。$\boldsymbol{\Phi}(t,\ t_0)$ 和 $\boldsymbol{\Phi}(t,\ \tau)$ 称为状态转移矩阵。

线性连续时变控制系统的状态空间表达式在一定条件下可以写成离散形式（离散化）

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}(kT+T)&=\boldsymbol{G}(kT)\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{H}(kT)\boldsymbol{u}(kT)\\ \boldsymbol{y}(kT)&=\boldsymbol{C}(kT)\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{D}(kT)\boldsymbol{u}(kT)\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

如果在所考察的区间 $[hT,\ kT]$ 上，$\boldsymbol{G}(kT)$ 为非奇异矩阵，且其对应的线性连续时变控制系统满足解的存在和唯一性条件，那么在所考察的区间上，式（2）的解为 $\boldsymbol{x}(kT)=\boldsymbol{\Phi}(kT,hT)\boldsymbol{x}_0+\sum_{i=h}^{k-1}\boldsymbol{\Phi}[kT,(i+1)T]\times\boldsymbol{H}(iT)\boldsymbol{u}(iT)$，式中 $\boldsymbol{\Phi}(kT,\ hT)$ 和 $\boldsymbol{\Phi}[kT,\ (i+1)T]$ 为状态转移矩阵，hT 为初始时刻。

shixu luoji

时序逻辑　(sequential logic)

输出不仅与当前输入的逻辑值有关，而且与在此以前曾经输入过的逻辑值有关的逻辑系统。具有这种逻辑关系的电路，称为时序逻辑电路，简称时序电路，它至少包含一个存储元件。常见的时序逻辑电路有：触发器、计数器、寄存器等。

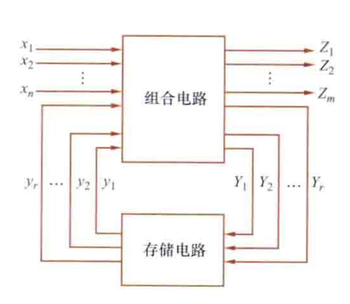


图 1　时序逻辑电路框图

组成　时序逻辑电路的框图见图 1，由组合电路（见组合逻辑）和存储电路两部分组成。存储电路是能存储信息的器件，可以是触发器，也可以是有时延的反馈，其作用是保存与过去输入有关的信息。

图中，$x_1,x_2,\cdots,x_n$ 是时序电路的外部输入；$Z_1,Z_2,\cdots,Z_m$ 是它的外部输出；$Y_1,Y_2,\cdots,Y_r$ 是存储电路的输入，$y_1,y_2,\cdots,y_r$ 是存储电路的输出，也反馈给组合电路的

输入。有如下两个时序函数表达式

$$Z_i = f_i(x_1, x_2, \cdots, x_n; y_1, y_2, \cdots, y_r)$$
$$(i = 1, 2, \cdots, m)$$

$$Y_i = g_i(x_1, x_2, \cdots, x_n; y_1, y_2, \cdots, y_r)$$
$$(i = 1, 2, \cdots, r)$$

其中，Z_i 称为输出函数，Y_i 称为控制函数或激励函数。在时序逻辑电路里，电路的输出由内部状态 $y_i(i = 1, 2, \cdots, n)$ 及当前的输入 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 共同决定，这意味着时序逻辑电路具有某种“记忆”功能。

分类 按照输出方式，可以将时序逻辑电路分成 Mealy 型和 Moore 型两类。按触发方式，时序电路可分为同步时序电路和异步时序电路两大类，其中异步时序电路又可进一步分为脉冲异步时序电路和电平异步时序电路。

Mealy 型时序电路　电路的输出状态与输入和现态有关，其输出函数形式为

$$Z_i = f_i(x_1, x_2, \cdots, x_n; y_1, y_2, \cdots, y_r)$$

Moore 型时序电路　电路的输出状态只与现态有关，其输出函数形式为

$$Z_i = f_i(y_1, y_2, \cdots, y_r)$$

同步时序电路　有统一的时钟脉冲 CP（Clock Pulse）信号，仅当 CP 信号到来时，电路状态才能发生改变，且只改变一次。在同步时序电路中，时钟信号不能太短，否则可能使电路状态产生混乱。图 2（a）是一个同步时序电路，其中 CP 是时钟信号。同步时序电路的输入可以是脉冲也可以是电平，对研究电路的行为来说，这两者没有差别。描述同步时序电路的逻辑工具是状态表和状态图，见图 2（b）和图 2（c）。状态表把时序电路的输入、输出、现态（目前状态）、次态（下一状态）用表格形式反映出来，说明输入与输出之间的逻辑关系，并表明状态之间的转移规律。状态图通常由状态表推出，更直观易读。状态图中小圆圈及其内的字母或数字表示状态，有向箭头表示状态转换方向，并在有向线上标注 x/Z，表示在 x 输入情况下输出为 Z，如 1/0 表示输入为“1”，输出为“0”。

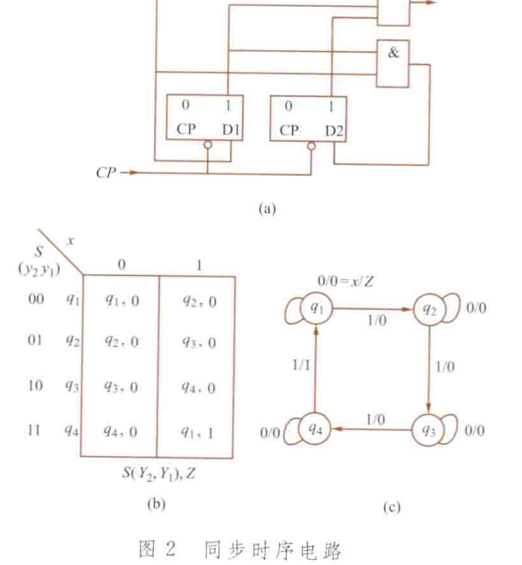


图 2　同步时序电路

（a）电路图；（b）状态表；（c）状态图

设计同步时序电路的一般步骤如下：①根据实际问题建立原始状态表；②对原始状态表进行简化；③根据简化后的状态表的状态数，确定状态变量，用状态变量的编码对每个状态进行赋值得出二进制状态表；④根据二进制状态表，把状态变量重新排列，得到表征次态和输出的 Y-Z 矩阵；⑤选择触发器并根据触发器的激励表和 Y-Z 矩阵求得激励函数和输出函数，并由此画出逻辑图。

脉冲异步时序电路　存储电路采用触发器，它可以是时钟控制触发器，也可以是基本 RS 触发器。在使用时钟控制触发器时，触发器不被统一的时钟脉冲同步，每个触发器的时钟端作为一个独立的输入端，电路状态转换仅在输入脉冲作用下发生。脉冲异步时序电路与同步时序电路的主要差别是电路的状态改变方式不同，前者在输入信号的控制下改变状态，而后者却在同一时钟脉冲控制下改变状态。

脉冲异步时序电路状态的改变直接依赖于输入脉冲，即每来一个输入脉冲，电路状态发生一次变化。由于触发器没有公共的时钟脉冲来同步，电路状态的转换将不可预测。为了使脉冲异步时序电路可靠工作，对脉冲异步时序电路的输入信号应作如下规定：①不允许在两个（或两个以上）输入端同时加输入脉冲；②第二个输入脉冲的到来，必须在第一个输入脉冲所引起的整个电路的响应完全结束之后。

电平异步时序电路　输入是电平信号，这种电路的状态变化依赖于输入电平的变化。电平异步时序电路没有时钟输入，并且存储电路不用触发器，而是用带时延的反馈。此电路的框图常画成如图 3（a）所示的形式，图 3（b）是其电路图。分析时可以认为门电路本身不再有时延，与反馈回路有关的时延都集中算在反馈回路的延迟线上，记为 Δt。

在电平异步时序逻辑电路中，当输入发生变化时，由于门电路的平均延迟时间不同，很难预测究竟哪一个状态变量变化速度快。各个状态变量变化速度的不同，可能会引起两个（或两个以上）状态变量同时发生变化，从而出现多个过渡状态。这些不同的过渡状态将使电路进入不同的稳定总态，这种现象称为竞争。竞争有非临界竞争和临界竞争之分。如果竞争的结果导致电路最终进入同一稳定总态，则称这种竞争为非临界竞争。反之，如果竞争结果导致电路最终进入不同的稳定总态，则称这种竞争为临界竞争。非临界竞争的存在不影响电路正确工作，不仅不必加以消除，有时还可以利用它来提高电路的工作速度。临界竞争的存在却会影响电路的正确工作，必须设法消除它。可以在组合电路部分中插入可控制的时延或者通过适当的状态赋值来消除临界竞争。如果由于竞争，在输出端出现尖峰（干扰），则称此电路具有险态。险态在组合电

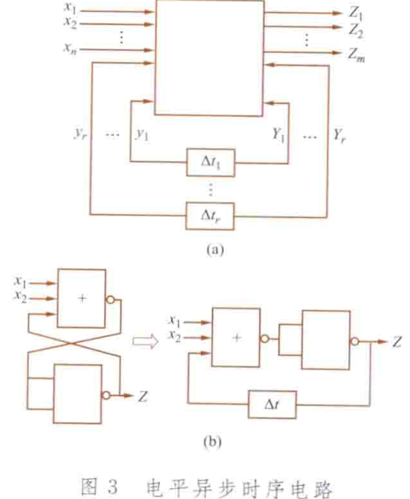


图 3　电平异步时序电路

（a）框图；（b）电路图

路和时序电路中都可能发生，而对电平异步时序电路有严重影响。为了消除险态，可在状态变量的反馈回路中插入时延单元，使输入变量变化完成后，再使状态变量产生变化。

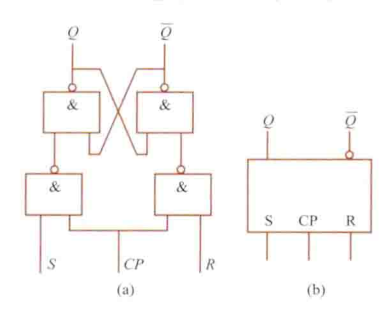
设计电平异步时序电路一般步骤如下：①建立原始流程表，此时，不但要确定各种输入下的稳态，还需确定各稳态之间转换所需要的过渡状态；②对原始流程表进行简化；③进行状态分配，由于在最简流程表中存在不稳定状态，分配时，不仅力求电路最简，还要避免造成误动作的临界竞争；④求出表征次态和输出的 Y-Z 矩阵；⑤用 Y-Z 矩阵画出逻辑图，此时，必须检查和消除各种可能出现的险态。

shixu luoji dianlu

时序逻辑电路 (sequential logic circuit) 任何时刻的输出状态不仅与该时刻的输入有关，而且还与电路历史状态有关的一种数字逻辑电路（见时序逻辑）。时序逻辑电路具有记忆输入信息的功能。常用的有计数器和寄存器。

shizhong RS chufaqi

时钟 RS 触发器 (clocked RS flip-flop) 只有在时钟信号作用期间内输入信号才对它的输出状态发生控制作用的触发器。它常用于时序逻辑电路中。



时钟 RS 触发器的电路结构和图形符号

(a) 电路结构；(b) 图形符号

时钟 RS 触发器的电路结构如图（a）所示，图（b）是它的图形符号。图（a）中 S 为置 1 输入信号，R 为置 0 输入，Q 和 $\overline{Q}$ 为两个互补输出，稳态时 Q 和 $\overline{Q}$ 的状态始终相反。CP (clock pulse) 是时钟信号输入信号。

电路的逻辑功能如表所示。其中 Q^n 表示触发器原来的状态（亦称现态），Q^{n+1} 表示触发器的新状态（亦称次态），×表示可以是 1 也可以是 0。从表中可看出，若 $CP=0$，无论 S、R 是 1 还是 0，触发器的状态始终保持不变。只有当 $CP=1$ 时，触发器的次态才受输入信号控制，此时 $S=1$、$R=0$，触发器被置 1；$S=0$、$R=1$，触发器被置 0；$S=0$、$R=0$，触发器状态不变。在 $CP=1$ 期间，如果 $S=1$、$R=1$，当输入信号或时钟信号消失后触发器的次态就无法确定，因此应避免工作时出现 $S=1$、$R=1$ 的输入情况，即要求遵守 $R \cdot S=0$ 的约束条件。

时钟 RS 触发器的功能表

CP	S	R	Q^n	Q^{n+1}
0	×	×	×	Q^n
1	0	0	0	0
1	0	0	1	1
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	1	0	不定
1	1	1	1	不定

shishi xitong

实时系统 (real-time system) 见操作系统。

shiyong chengxu

实用程序 (utility program) 系统软件中常用的一组程序。它为操作系统、软件环境、应用软件和用户提供有效的支撑和服务。包括编辑程序、连接装配程序、诊断程序、跟踪程序、环境维护程序、文件操作程序和调试程序等。诊断程序用于对计算机硬件或软件故障进行检测并确定其位置。跟踪程序是利用设在程序中的显示指令检验源程序的执行过程是否合乎计算意图的一种程序。主要方式有：①路线追踪；②赋值跟踪；③变量跟踪；④追溯跟踪。环境维护程序包括设置系统配置，修改环境变量和建立工作环境。文件操作程序的主要功能有显示、转储、归并、分类、查找和修改等。

shizai gonglü

视在功率 (apparent power) 二端电路端电压的有效值和电流的有效值的乘积，又称表观功率。

令 U 和 I 分别为二端电路电压和电流的有效值，S 为视在功率，则有

$$S=UI$$

视在功率能表示在一定的有效值电压和电流下，二端电路可能获得的平均功率的最大值。工频交流发电机和变压器等电工设备的额定电压值与绕组绝缘、铁芯的截面积及铁损耗有关，而其额定电流值则与绕组导线截面积及铜损耗有关。额定视在功率（见三相电路功率）可以看成该电工设备的最大利用容量和设计极限值。

shiying kongzhi xitong

适应控制系统 (adaptive control system) 应用适应控制律来修正可调系统的参数或者产生一个辅助的输入信号，使系统性能指标接近于规定的指标的控制系统，又称自适应控制系统。适应控制系统是从 20 世纪 50 年代开始研究的，随着控制理论和电子计算机技术的发展，20 世纪 70 年代以后，有了迅速的进展。

适应控制系统已有多种形式，最常见的是模型参考适应控制系统和自校正适应控制系统两种。

模型参考适应控制系统　如图 1 所示。其中，$y(t)$ 和 $y_m(t)$ 分别是被控对象和参考模型的输出，$e(t)$ 是输出误差，$r(t)$ 是系统的输入信号。整个系统由两个控制回路组成：内回路是被控对象和前馈调节器、反馈调节器组成的可调系统；外回路由参考模型和适应控制律组成。当被控对象受干扰影响或模型参数发生变化，使被控对象的输出与优化的参考模型的输出产生偏差时，系统能通过一定的适应控制律，修改调节器的参数（图 1 中虚线所示的信号）或产生一个辅助控制信号（图 1 中实线所示的信号），促使被控对象与参考模型的输出相一致。（见模型参考适应控制系统）

自校正适应控制系统　如图 2 所示。其中，$y(t)$ 是被控对象的输出，$r(t)$ 是系统的输入信号。整个系统也由两个回路组成：内回路是反馈调节器、前馈调节器和被控对

象，它类似通常的反馈控制系统；外回路是递推参数估计算法和调节器参数设计算法。系统运行时，首先进行被控对象参数的在线估计，然后根据估计的参数值，进行调节器参数的选择设计，并根据参数的设计值，修改调节器的参数。

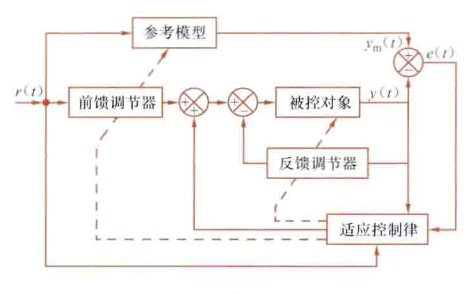


图 1　模型参考适应控制系统

自校正适应控制系统，具有确定性等价性质，即当系统中所有未知参数用相应的估计值代替后，其控制规律与对应的参数已知的随机最优控制规律相同。因此，在设计自校正适应控制规律时，可以根据确定性系统的设计办法：假定系统的所有参数是已知的，综合出系统的最优控制规律，然后用估计所得的参数来代替最优控制规律中的未知参数，就可得自校正适应控制律。（见自校正适应控制系统）

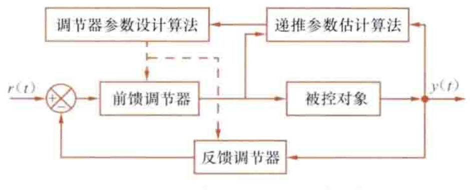


图 2　自校正适应控制系统

shiying kongzhi xitong wending lilun

适应控制系统稳定理论　(stability theory of adaptive control system)　判定适应控制系统稳定性的基本理论，有李雅普诺夫稳定理论（见模型参考适应控制系统）和超稳定理论。

超稳定理论　1964 年由罗马尼亚学者波波夫（V. M. Popov）提出。用于模型参考适应控制系统，有以下步骤：

（1）将模型参考适应控制系统变换成一个由线性定常前向环节和非线性时变反馈环节组成的等价多变量非线性时变反馈系统，如图所示。



多变量非线性时变反馈系统

（2）找出满足波波夫不等式的适应控制律。如图，线性部分状态模型为

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{Ax} + \boldsymbol{Bu} = \boldsymbol{Ax} - \boldsymbol{Bw} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{Cx} + \boldsymbol{Du} = \boldsymbol{Cx} - \boldsymbol{Dw} \quad (2)$$

且完全可控、可观测，$\boldsymbol{x}$ 为 n 维向量，$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{v}$、$\boldsymbol{w}$ 均为 m 维向量。非线性部分模型为

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{f}[\boldsymbol{v}(t), t_1] \quad 0 \leqslant t \leqslant t_1 \quad (3)$$

波波夫积分不等式为

$$\int_0^t \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{v} \, \mathrm{d}t > -r_0^2 \quad t_1 > 0 \quad (4)$$

或

$$\int_0^t \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{v} \, \mathrm{d}t \leqslant r_0^2 \quad t_1 > 0 \quad (5)$$

这里，r_0^2 为有限正常数。

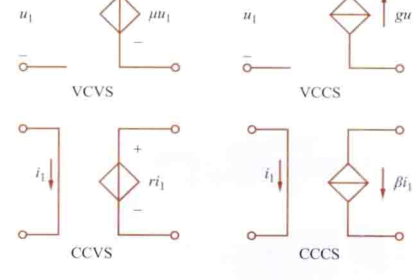
系统超稳定性和超渐近稳定性：上述不等式满足且总能找到相应的正的常数 K 和 r_0^2，使系统状态方程解的一切形式在时间区间 $0 \leqslant t \leqslant t_1$ 内都满足条件 $\|\boldsymbol{x}(t)\| \leqslant K(\|\boldsymbol{x}(0)\| + r_0^2)$，这种系统便称为超稳定的。其中 $\boldsymbol{x}(0)$ 是系统的初始状态，$\|\boldsymbol{x}(t)\|$ 是状态向量 $x(t)$ 的范数。如果 $t \to \infty$ 时还有 $\boldsymbol{x}(t) \to 0$，则称系统是超渐近稳定的。超稳定理论适用于线性系统和非线性系统，定常系统和时变系统。

（3）确定等价系统前向环节成为严格正实的所必需的附加条件：澳大利亚学者 B. D. O. Anderson1968 年证明，系统的超稳定性等价于系统传递函数矩阵的正实性，系统的超渐近稳定性等价于系统传递函数矩阵的严格正实性。一个传递函数矩阵 $\boldsymbol{G}(s)$ 为正实的条件是：① $\boldsymbol{G}(\bar{s}) = \overline{\boldsymbol{G}(s)}$，这里 $\bar{s}$ 是 s 的共轭复数变量，$\overline{\boldsymbol{G}(s)}$ 是 $\boldsymbol{G}(s)$ 的共轭复数矩阵；②$\boldsymbol{G}(s)$ 在复变量 s 的右半开平面上解析，且在虚轴上仅有简单的极点，而对应于这些极点的留数矩阵为正定埃尔米特矩阵；③ $\boldsymbol{G}(s) + \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}(s)$ 在 s 的右半开平面为正半定埃尔米特矩阵，这里 $\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}(s)$ 为 $\boldsymbol{G}(s)$ 的转置矩阵。在正实性的条件中，把条件②改为 $\boldsymbol{G}(s)$ 在包括虚轴在内的右半闭 s 平面上解析，把条件③改为 $\boldsymbol{G}(s) + \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}(s)$ 在右半闭 s 平面上是正定埃尔米特矩阵，则相应地称传递函数矩阵是严格正实的。

（4）将等价系统返回到原系统，完成整个模型参考适应控制系统的框图。

shoukongyuan

受控源　(controlled sources)　受电路中另一部分的电流或电压控制的电压源或电流源。受控电压源的输出电压和受控电流源的输出电流与负载大小无关，受控电压源的电压和受控电流源的电流不是独立的，而是某一控制量（另一支路的电压或电流）的函数。根据控制量是电压还是电流，受控源是电压源还是电流源，受控源分为四种：电压控制电压源（VCVS）、电压控制电流源（VCCS）、电流控制电压源（CCVS）和电流控制电流源（CCCS）。如图所示，受控源可用具有二端口的电路模型表示，其中受控源输出为一个端口，控制支路为另一个端口。图中 μ、g、r、β 分别为各受控源的控制系数，当它们为常数时，对应的受控源称为线性非时变受控源。



四种受控源的电路模型

受控源是从电子器件中抽象出来的一种电路元件，在分析电子电路时经常会遇到。

shuchu fankui

输出反馈　(output feedback)　见线性二次型次优控制。

shuchu shebei

输出设备 (output device) 将计算机处理过的信息变换成人或外界过程所要求的信息形式的设备。输出设备把处理过程或结果显示、打印或记录在纸或磁性媒体上，也可用模拟量、语音、图形等形式输出。

输出设备有打印机、数字绘图机、显示器等。

打印机 按打印方法分为击打式和非击打式打印机。

击打式打印机 用机械击打活动字符，使色带和纸相撞而打印字符，或用钢针撞击色带在纸上打印点阵字符图形的设备。击打式打印机又分为行式和串式打印机。

(1) 行式打印机。逐行打印，一行字符数有 80、132、160 等几种，字符种类有 48、128 等。

(2) 串式打印机。逐字逐行打印，分点阵和菊花瓣两类。①点阵打印机：用 m 根针打印出 n(横) $\times m$(纵) 点阵组成的字符图形，其格式有 5×7、7×9、9×9。汉字点阵格式有 15×16、22×24、32×32。②菊花瓣打印机：打印机机构里装有菊花瓣形字盘，作正向或反向转动，使要打印的字符转到打印位置，在控制线路的作用下，经色带将字符打印到纸上。

非击打式打印机 用物理或化学方法打印字符图形的设备，字符按点阵格式形成。有激光打印机、热感应打印机、喷墨打印机等。

(1) 激光打印机。用激光束射向感光体表面产生电位变化，生成“潜像”。在静电作用下，使带有极性相反电荷的色粉微粒对“潜像”着色，然后再使色粉图像转印到普通纸上，并经热压处理，生成可永久保存的印刷件。它由机芯和控制器组成：①机芯。包括激光扫描系统、电子照相及控制部件、输纸机构。②控制器。主要用于控制激光束的高速扫描和感光体表面的低速移动。

(2) 热感应打印机。有热敏式和热转印式两种：①热敏式。将打印信息转化成热感应打印头的温度变化，在热敏记录纸上形成黑白图像。②热转印式。用热感应色带，由热感应打印头的温度变化，将色带上的油墨转印到纸上形成图像。这类打印机，具有丰富的色彩和层次，速度低于激光打印机。

(3) 喷墨打印机（见图 1）。有连续喷墨型与随机喷墨型两类。前者利用荷电的墨滴对所穿过电场的敏感程度引起不同的偏移，在纸上打印出字符。后者只是在需要时才从喷嘴喷射墨滴。这类打印机，可打印出逼真的彩色图文。



图 1 喷墨打印机

数字绘图机 一种能在纸张、薄膜和胶片等记录媒体上绘出计算机生成的各种图形或图像的设备。如图 2 所示，计算机输出绘图数据，经插补器产生 X 向和 Y 向的给进脉冲，送入驱动设备，驱动绘图笔在绘图台平面上运动，并控制绘图笔的起落，在绘图纸上绘制图形。

还有一种以感光片代纸的特殊绘图机，称为光绘机。它在计算机控制下，直接在感光片上形成图形，用于制造印刷电路板。

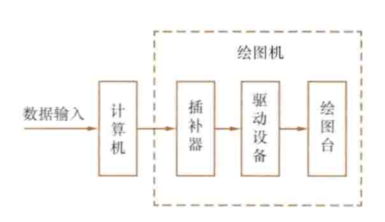


图 2 绘图机联机工作

显示器 将计算机输出信号变换成可视的光信号的设备。分字符显示器和图形显示器两种。

字符显示器 将计算机输出以字符图形点阵形式显示在阴极射线管（CRT）屏幕上的设备。点阵格式有 5×7、7×5、7×9，其组成如图 3 所示。键盘为交互式显示器的输入部件；显示存储器存储要显示的 ASCII 码；字符发生器存储着字符的点阵信息；定时控制线路维持显示器正常工作及 CRT 电子束扫描。

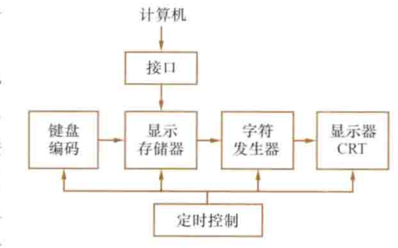


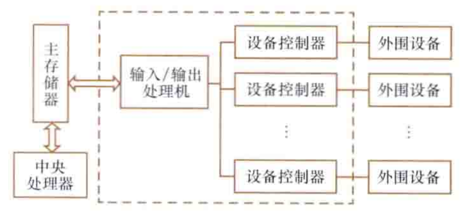
图 3 字符显示器组成图

图形显示器 见图形输入/输出设备。彩色显示器常用的接口是视频图形门阵列适配器（VGA），它将计算机输出的数字信号经数字/模拟转换器变为模拟量，控制红、绿、蓝形成彩色图形，显示的彩色和灰度丰富、分辨率高。

shuru/shuchu chuliji

输入/输出处理机 (input/output processor) 控制外围设备和输入/输出操作的专用处理器，也称外围处理机。在计算机输入/输出控制系统中有类似通道的作用。但由于输入/输出处理机是一台完整的处理机，有丰富的指令系统和很强的中断功能，有些输入/输出处理机还带有一定容量的存储器，因此它的功能远比通道的功能强。

结构 输入/输出处理机与主存储器及输入/输出设备控制器的连接如图所示。图示虚线所包括的范围为输入/输出控制系统。



输入/输出处理机与设备控制器连接框图

特点 输入/输出处理机比起一般的通道结构具有以下特点：

(1) 输入/输出处理机具有比通道更完善的指令系统，它不仅有对数据进行装配、拆卸和对外围设备进行控制的指令，而且有一套可访问中央处理机、外围设备及对数据进行格式变换、串/并转换、码制变换和数据分类等加工处理的指令，为执行输入/输出控制提供了较强的功能。

(2) 输入/输出处理机具有一定容量的存储器及方便执行上述指令的硬设备，为输入/输出处理机独立执行输入/输出操作提供了硬件基础。

(3) 输入/输出处理机本身就有较完整的输入/输出设备控制部件、接口和线路，为连接输入/输出设备提供了方便

条件。

功能　由输入/输出处理机的上述特点，可确定其功能如下。

（1）能实现输入/输出传送操作全过程的控制，包括传送前的处理及传送后的处理等。当中央处理器要使用外围设备时，只要向输入/输出处理机发送命令及有关参数即可，其余工作全部由输入/输出处理机独立完成，从而使中央处理器有更多的时间作高速数据处理。

（2）输入/输出处理机对输入/输出传送操作的控制程序，一般是存放在自己的存储器中，而不像通道那样存放在主机的主存储器中，所以输入/输出处理机比起通道来说有更大的独立性，执行输入/输出传输控制时既不依赖于中央处理器，也不依赖于主存储器。

（3）简化了设备控制器的结构，有些设备控制器的职能可以由输入/输出处理机实现，提高了输入/输出操作控制的智能化和分布处理的程度，还可以用功能更简单一些的微处理器或单片机作设备控制器用。这也是输入/输出处理机的一种应用。

shuru/shuchu kongzhi xitong

输入/输出控制系统　(input/output control system)

对计算机输入/输出操作实施控制的系统。它是输入/输出系统两大组成部分之一，由与输入/输出操作有关的硬件和软件组成。

功能　输入/输出控制系统的主要功能包括：①组织和控制输入/输出设备的数据传送；②管理与检测外围设备的操作和状态。

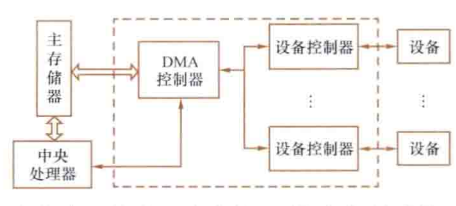
结构　取决于控制方式。随着计算机系统组织结构的发展，输入/输出控制方式有程序控制方式、中断方式、直接存储器存取控制方式、通道控制方式和输入/输出处理机控制方式。这些不同的输入/输出控制方式，都是本着追求输入/输出操作和中央处理器操作的更大并行性、输入/输出控制的更大独立性、外围设备连接的更大方便性为目标的。

（1）程序控制方式。由中央处理器通过程序直接控制外围设备完成输入/输出操作。按这种方式控制时，输入/输出操作与中央处理器操作是完全串行的，很慢的输入/输出操作要占用大量的中央处理器时间，使中央处理器的效率降低。

（2）中断方式。外围设备发出中断请求，计算机执行完成现行指令后，响应中断，暂停正在运行的程序，转入中断服务程序，控制外围设备的输入/输出操作。操作结束后，中断服务程序返回被中断的程序，使原程序继续运行。

（3）直接存储器存取（direct memory access，DMA）控制方式，简称直接存取方式。不经过中央处理器、直接用硬件实现外围设备与主存储器之间的高速数据传送，中央处理器只控制外围设备的起动和状态检测等操作，不介入数据的输入/输出传送过程。这种控制方式的关键部件是DMA控制器，其结构框图如图中虚线框所示。

直接存储控制方式包括DMA控制器和设备控制器等。DMA控制器挪用中央处理器的周期，控制数据输入/输出。在DMA传送数据期间要占用系统总线，该期间中央处理器不能使用总线。这种输入/输出控制方式适用于设备速度较快，设备数量不多的情况，例如磁盘机、磁带机等。



直接存取控制方式的输入/输出控制系统

（4）通道控制方式和输入/输出处理机控制方式，详见输入/输出设备控制器。

shuru/shuchu shebei kongzhiqi

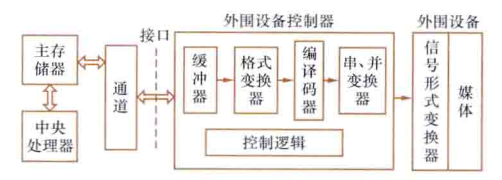
输入/输出设备控制器　(input/output device control unit)

计算机的输入/输出控制系统中与外围设备直接连接的功能控制部件，也称外围设备控制器，简称设备控制器。它位于通道或处理机与外围设备之间，接收通道或处理机送来的命令，控制外围设备完成所要求的操作，实现外围设备与通道或处理机之间的数据变换和传输，向通道或处理机反映设备或设备控制器本身运行的状态。

分类　根据输入/输出设备控制器的工作方式和结构的不同，可以分为以下几种：单通路、多路选择、多路交叉和综合型输入/输出设备控制器。①单通路输入/输出设备控制器。每个控制器只连接和控制一台外围设备。②多路选择输入/输出设备控制器。它能连接和控制多台外围设备，但只有一个数据传送通路，当某台设备进行数据传送时便独占控制器，但外围设备的某些辅助性控制操作也可在不占用控制器时完成。③多路交叉输入/输出设备控制器。一台控制器能控制多台设备，同时使用控制器传送数据，每台外围设备是以一个字节或多个字节为单位，交替轮流使用控制器进行数据传送。④综合型输入/输出设备控制器。该控制器具有各种不同外围设备之间传送数据的内部通路，能控制多台不同类型的外围设备，根据通道或处理机送来的命令，在不同类型设备之间相互进行数据传送。

功能　无论哪种输入/输出设备控制器，均具有以下基本功能：①控制外围设备的各种具体操作，如起动、停止、输纸和走带等；②提供外围设备与通道或处理机之间的数据传送路径，并对数据传送提供定时控制；③提供必要的数据缓冲器，以平衡外围设备与处理机之间的数据流量，满足异步方式传送的需要；④实现数据在计算机内与在媒体中不同格式和不同编码之间的变换；⑤实现计算机与外围设备之间数据的串、并行变换；⑥实现对外围设备的检查、诊断和维护，并向处理机报告外围设备的状态等。

结构　输入/输出设备控制器的组成，及与通道和外围设备的连接示意图如图所示，这属于单通路输入/输出设备控制器。



外围设备控制器组成连接示意图

shuru /shuchu xitong

输入/输出系统 (input/output system) 计算机系统中的主机与外部进行通信的系统。它由外围设备和输入/输出控制系统两部分组成，是计算机系统的重要组成部分。外围设备包括输入设备、输出设备和磁盘存储器、磁带存储器、光盘存储器、U 盘存储器等。从某种意义上也可以把磁盘、磁带、光盘和 U 盘等设备看成一种输入/输出设备，所以输入/输出设备与外围设备这两个名词经常是通用的。

在计算机系统的发展过程中，输入/输出系统的结构变迁和发展占有极为重要的地位，研制新的外围设备，组织、控制和管理好日益增多的外围设备，是提高计算机系统性能的关键之一。

shuru shebei

输入设备 (input device) 把待输入的信息转换成计算机能处理的数据形式，并送入计算机的设备。待输入信息有模拟量、数字、文字、字符、语音、图像等，必须转换成相应的代码后才能由计算机处理。

输入设备主要有字符输入设备、图形输入设备及语音输入设备等。

字符输入设备 把表示数字和字符的信息转换成编码的电信号输入计算机的设备。主要有键盘输入设备、磁卡输入设备等。

键盘输入设备 把按键在键盘上的位置转变成对应编码信息输入计算机的设备。键盘由排列成阵列形式的按键组成，按键有机械触点式、电容式、薄膜式等多种。

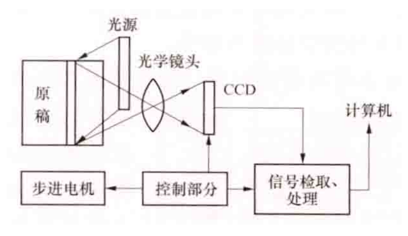
磁卡输入设备 把以条形码形式记录在磁卡上的数据输入计算机的设备。磁卡也可记录计算机的输出数据。

图形输入设备 把图形信息转换成电信号输入计算机的设备。主要有鼠标器、扫描仪等。

鼠标器 在交互式图形系统中，提供位置信息的输入设备。它是一个手持小盒。按工作原理分机械式和光电式两种。①机械式鼠标器。在桌面上移动时，底部的轮子随之转动，由与轮子相连接的电位器检测出在两个相互垂直方向上的位移量，将其转换成数字量后输入计算机。②光电式鼠标器。在刻有网格线的专用板（垫）上移动时，由装在底部的光电器件检测出在水平和垂直方向的相对位移量，输入计算机。

鼠标器有两种接口：一是专用鼠标接口；二是通过 RS-232C、USB 串行口接入，按字符方式送入计算机。后一种方式已被多数鼠标器所采用。

扫描仪 将原稿上的图形、文字信息输入计算机的设备，采用电容耦合器件（CCD）线阵的固态器件。CCD 扫描仪如图所示。由几千个感光元件构成的 CCD 器件制作在 20～30mm 长的衬底上。用长条状光源投射原稿，通过光学镜头在 CCD 感光区成像。由 CCD 器件串行输出一行模拟图像信号，经信号检取、处理单元，输出一行处理结果，送给计算机。扫描整幅图像的方法有滚筒式（光学成像系统固定而原稿移动）和平面式（光学成像系统移动而原稿固定）。



CCD 扫描仪示意图

CCD 扫描仪由于融进了微机技术，不仅能捕捉二值化图形，在屏幕上显示黑白图形；还能捕捉灰度图像信号和彩色图像信号（即彩色扫描仪）。

低速扫描仪采用 IEEE 488、RS-232C、USB 标准接口；高速扫描仪采用直接存储器存取（DMA）方式或中断请求方式传送的接口板。

语音输入设备 以语音方式输入计算机的设备，也称语音识别系统。通常分为孤立单词识别、连续语音识别与语音理解。它用于口呼数据采集系统、声控部件分拣系统和声音输入系统等。

shujiegou

树结构 (tree) 由 $n(n\geqslant 0)$ 个结点的有限集合构成的一种数据结构。当 $n=0$ 时称为空树。非空树递归定义如下：①有且仅有一个称为根的结点；②其余结点可分为 m（$m\geqslant 0$）个互不相交的子集，其中每一个子集本身又是一棵树，称为子树。树结构在客观世界中广泛存在，也是程序设计中各种信息的重要组织形式之一。

树中的结点包含一个数据元素及若干指向其子树的分支。结点拥有的子树数（分支数）称为该结点的度，用 k 表示。度为 0 的结点称为叶或终端结点；度不为 0 的结点称为分支结点或非终端结点。树中各结点的度的最大值称为树的度。树是一种层次结构，结点的层次从根开始定义，根为第一层，若某结点在第 i 层，则其子树的根为第 $i+1$ 层。树中结点的最大层次称为树的深度或高度。若树中各结点的子树之间在逻辑上存在顺序关系，则称该树为有序树；否则，称为无序树。

在计算机中，通常采用多链式存储结构来表示树结构。对树的操作有：①检索树中的结点；②遍历树中各结点，即按某种规则巡访树中每个结点，使得每个结点被访问一次且仅访问一次；③添加子树；④删除子树等。

在程序设计中较广泛使用的树结构有二叉树和霍夫曼树。

(1) 二叉树：度 $k\leqslant 2$ 的有序树。二叉树与一般树（度 $k>2$ 的 k 叉树）之间存在一种一一对应的转换算法。在通常采用的用同构（等长）的多链式存储结构表示的树中，二叉树的密度最高。因此，二叉树除了本身有着广泛的用途外，还可以用作一般树的存储结构。

(2) 霍夫曼（Huffman）树：带权路径长度最短的二叉树。带权路径长度是从根到树中所有带权叶子之间的路径长度与树的乘积之和。根据给定的一组权值，构造一棵相应的 Huffman 树的算法，称为 Huffman 算法。Huffman 树有着广泛的应用，如在解决某些判定问题时，利用 Huffman 树可以得到最佳的判定算法；在快速远距离通信中，可以得到编码长度最短的编码。

shuju

数据 (data) 能被计算机接受和处理的各种描述事物属性的表示。包括整数、实数、字符、文字、表格、图

形、图像和声音等。数据是程序设计的加工对象，能输入到计算机中，按人们的要求加以处理（编辑、存储、传送、分类、计算、转换、检索、制表和模拟等），以得到所需要的结果。数据经过解释并赋予一定的意义以后，便称为信息。

数据的基本单位是数据元素，有时，一个数据元素可由若干个数据项组成，数据项是数据不可分割的最小单位。

shuju baomi jishu

数据保密技术 （data security technology） 计算机和通信系统中保护数据的科学技术。

计算机和通信系统中的数据面临许多自然的或人为的、有意的或偶然的损害。这些损害对数据造成两种后果，完整性受损或信息流向错误。①完整性受损，数据失去其应有的面目。②信息流向错误，数据或其有关信息落入了不应被拥有的主体。

冒充某个用户输入数据的行为虽不一定造成以上两种损害，但会使系统受骗，错误地认识数据的产生者和事务的责任者，导致系统错误地工作。因此，数据保密技术的主要任务有三方面：①保护数据的完整性；②保护数据具有正确的信息流向；③确认数据的产生者和事务责任者。

保护数据的完整性　存取控制与正确的授权规则相结合，用以保护存储在计算机中的文件及数据的完整性；完整性约束，用以限制和发现对数据完整性的损害；并发控制，用来防止并发事件对数据完整性的损害；误码的检测和纠正，用以保护因误码而对数据完整性的损害；密码技术对数据完整性检测，用以发现对数据完整性的有意损害，也可用于检测外来软件中潜藏的破坏因素；适当地设置保留数据和备份副本，可使数据遭受损害后具有某种恢复能力；完善管理措施。

保护信息的正确流向　采用密码技术以保护传输数据和专用存储数据不致泄露；采用存取控制与信息流向控制或密码技术相结合以保护存储数据有正确流向；采用推断控制以防止统计数据库中的信息泄露；采取措施减小电磁辐射和串话；完善保密管理。

确认数据的产生者和事务责任者　采用个人识别符（或口令）以识别用户，并与密码技术结合以防止在线路上或系统中泄露识别符；用户与系统之间重要的数据交换采用确认数据产生者的措施，将数据和个人识别符联系并采用密码技术；采用数字签名技术用于确认数据产生者，不但可用于系统对用户的确认，也可用于用户相互间的确认。

密码技术　研究密码体制的技术。它是密钥控制的明文到密文的可逆变换。其中，明文指待加密的信息，密文指明文经加密处理后的形式。明文变换成密文称为加密，其逆称为解密。加密解密所使用的参数称为密钥。

密码系统是用于加密和解密的系统。加密时系统输入明文和加密密钥，加密变换后输出密文。解密时系统输入密文和解密密钥，解密变换后输出明文。一般可采用对称密码体制或非对称密码体制。对称密码体制是加密密钥和解密密钥相同的密码体制，有分组密码和流密码两种。分组密码对加密消息分组，每次使用相同的密钥对其中的一个分组进行加密；流密码每次对消息的一个比特（字节或字）进行操作，并采用一些反馈机制，其密钥在加密解密过程中一般是变化的。非对称密码体制的加密密钥和解密密钥不同，比较流行的有基于因子分解难题的和基于离散对数问题的两类，前者如 RSA 密码算法，后者如 ElGamal 公钥密码和椭圆曲线公钥密码。

shuju biaoshi

数据表示 （data representation） 处理机硬件能识别和处理的数据表示方法。是设计人员根据处理机系统结构要求而规定的。计算机中原始数据有着各种不同的形式，在进行处理之前，必须转换成处理机规定的格式。计算机中常用的各种数据结构（串、队、阵列、矩阵、链表、记录和文件等）也需由系统程序员利用各种算法经软件映像而转换成相应的格式。

计数制　若干个数码的组合来表示一个数，每个数码的值与其在数中所处的位置有关。一位十进制数可以用 0，1，2，…，9 等 10 个数码中的任一个来表示，一位二进制数可以用 0 或 1 来表示。每个数码处在不同的位置时所代表的数值不同。每个数码所表示的数值等于该数码本身乘以一个它所在位置有关的常数，这个常数称为权。一个数码可以选用的值的个数就是相应的计数制的基数，十进制数的基数为 10，二进制数的基数为 2。

十进制数的值可以用一组有序的数码或多项式表示，在 $537.24=5\times10^2+3\times10^1+7\times10^0+2\times10^{-1}+4\times10^{-2}$ 式中每个数位的权分别为 10^2，10^1，10^0，10^{-1}，10^{-2}。二进制数的表示方法类同，在 $1011.01=1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+1\times2^0+0\times2^{-1}+1\times2^{-2}$ 式中每个数码的权分别为 2^3，2^2，2^1，2^0，2^{-1}，2^{-2}。其对应的十进制数为 11.25。二进制数运算规则简单，且具有两个稳定状态（可分别定义为 0 和 1）的物理器件容易获得，因此在计算机中普遍采用二进制位计数制。在二进制的基础上为书写方便引出八进制（它由三个二进制位代表一个数位的八进制）和十六进制（它由四个二进制位代表一个数位的十六进制）计数法。

在计算机中一个十进制数位由四个二进制数位编码组成，称二-十进制数或 BCD 码。取十六种组合中的十个组合分别表示 0，1，2，…，9，舍去多余的六种组合。

小数点的表示　计算机中小数点的表示方法有定点和浮点两种。

（1）定点表示。小数点隐含的某个特定位置，小数点在有效数位的最右端称为定点整数，小数点在有效数位的最左端称为定点小数。定点表示法表示的数据范围受到限制：用户的初始数据、中间结果或最后结果可能在很大范围内变化，程序设计者必须在运算的各个阶段预先引入适当的比例因子，把数据统一放大或缩小，以满足定点表示的要求。

（2）浮点表示。小数点位置随阶码大小浮动。用通式表示为：$F\times r^E$，其中 F 称尾数，表示数的有效数位；E 称阶码（或指数），表示小数位置的参数；r 称基值，表示 F 和 E 两个参数的记数基值。

对一个特定的计算机，基值 r 是约定的（定为 2 或 4 或 8 或 16 等）。计算机中一个浮点数包括尾数和阶码两部分，其格式已趋标准化。1985 年发布的 IEEE754 标准中定义的浮点格式为 | S | E | F |，已被广泛采用。其中 S 为数的符号；E 为指数部分，表示实际小数点的位置，用移码表示；F 为小

数部分（尾数值），用原码表示。IEEE754 标准定义的浮点格式参数见表，规格化数在二进制小数点左边有一位隐含的“1”，故尾数位数比 F 多一位。

IEEE754 标准定义的浮点格式参数

参　数	单精度	扩展单精度	双精度	扩展双精度
指示精度位	24	≥32	53	≥64
最大指数	+127	≤+1023	+1023	≤+16 383
最小指数	−126	≥−1022	−1022	≥−16 382
指数部分位数	8	≥11	11	≥15
尾数部分位数	23	≥31	52	≥63

对单精度数：

（1）若 $E=255$，且 $F\neq 0$，称非数；

（2）若 $E=255$，且 $F=0$，则 $N=(-1)^S\times\infty$；

（3）若 $0<E<255$，则 $N=(-1)^S\times 2^{E-127}\times(1\cdot F)$；

（4）若 $E=0$，且 $F\neq 0$，则 $N=(-1)^S\times 2^{-126}\times(0\cdot F)$；

（5）若 $E=0$，且 $F=0$，则 $N=(-1)^S\times 0$。

对双精度数：将上面的 255、127、126 分别替换成 2047、1023 和 1022 即可。

在浮点表示中小数点位置可以浮动，一个浮点数的表示形式不是唯一的。尾数值 F 最高位为 1 的浮点数称为规格化浮点数。在运算过程中若出现非规格化形式时，则必须进行规格化处理。处理方法是：①若尾数值最高位为 0，则将尾数值左移一位，且阶码值减 1，直到尾数值最高位出现 1 为止；②若尾数值大于 1，则尾数值右移一位，且阶码值加 1；③若尾数值为 0，则不需规格化。

在机器位数相同的情况下，浮点比定点所能表示的数的范围大，且精度高。

带符号数的表示　在计算机中数的符号分别用 0 表示正，1 表示负。符号位在数的最左边。一个带符号的正数，在处理机中只有唯一的表示法：符号位之后跟以数的绝对值（数据+1011，表示为 01011）。但带符号的负数却有三种表示方法：①原码表示，符号位之后跟以数的绝对值（数据−1011，原码表示为 11011）。②反码表示，符号位之后跟以数的绝对值的反码，二进制绝对值代码中 1 的反码为 0，0 的反码为 1（数据−1011 的反码表示为 10100）。③补码表示：符号位之后跟以数的补码即数的反码+1（数据−1011，补码表示为 10101）。同一负数有原码、反码和补码三种不同表示方法，对应有三种不同的运算规则。

字符数据的表示　若干二进制位组合编码定义各种字母、数字、运算符、关系符、控制符以及其他特殊符号，供计算机输入、输出及文字信息处理用。中国国家标准 GB 1988—1998《信息技术 信息交换用七位编码字符集》中规定，7 个二进制位表示 128 个字符，包括 32 个控制字符、94 个图形字符和一个间隔字符、一个抹掉字符。

shuju cangku

数据仓库

（data warehouse）　一个用以更好地支持企业或组织进行决策分析处理，面向主题、集成、不可更新、随时间不断变化的数据集合。数据仓库的作用是为决策者提供所需的信息。

起源　20 世纪 70 年代起，数据库技术迅速发展。传统的数据库是以单一数据资源为中心，保存了大量的日常业务数据，并能完成一般意义上的事物处理、批处理和决策分析等。但是，传统数据库对于分析处理提供的辅助决策信息太少，对多变的市场环境不能做出快速反应。于是，数据仓库的技术从 90 年代中期开始盛行起来。

数据仓库与数据库存储数据的区别　数据库存储的数据是操作型数据，而数据仓库存储的数据是分析型数据。它们之间的区别如表所示。

主要特征　①面向主题。主题是数据归类的标准，每一个主题对应一个宏观的分析领域。②数据集成。数据进入数据仓库之前，必须经过加工集成，将原始数据结构从面向应用转变到面向主题。③数据稳定。由于数据仓库包含大量历史数据，极少或根本不更新。④随时间变化。分析型数据键码含有时间项，标明数据的历史时期，一般有效期是 5～10 年。⑤数据量通常为 10GB（Gigabyte），大型数据仓库是一个 TB（Terabyte）级（1024GB 级）的数据库。⑥需要巨大的硬件平台和并行的数据库系统。

操作型数据和分析型数据的比较表

操作型数据	分析型数据
细节的	综合或提炼的
在存取瞬间是准确的	代表过去的数据
可更新	不更新
操作需求事先知道	操作需求事先不知道
事务驱动	分析驱动
一个时间操作一单元	一个时间操作一集合
面向应用	面向分析
一次操作数据量小	一次操作数据量大
支持日常操作	支持管理操作

应用　数据仓库的应用是多方面的。特别是在市场和销售领域，它直接对企业的盈亏产生影响。如联合太平洋铁路公司，将几百个数据库合并转换成数据仓库应用系统，能准确识别豁免税购买，一年节省约 100 万美元营业税。该系统在可支付账目、设备维护、市场营销以及汽车和车头调动等方面提高了效率，改进了服务质量。

参考书目

王珊，等．数据仓库技术与联机分析处理．北京：科学出版社，1998.

shuju duixiang

数据对象

（data object）　在应用程序中引用的任何数据结构元素。数据对象，简称为对象，是使用编程语言允许的字符命名，是性质相同的数据元素的集合，是数据的一个子集，是一种运行时的概念。除了变量的数值特征外，数据对象还将与数据相关的其他属性（数据状态、报警限值等）以及对数据的操作方法（存盘处理、报警处理等）封装在一起，作为一个整体，以对象的形式提供服务。总之，可以由一组属性来定义的实体都可以被认为是数据对象。

shuju jiegou

数据结构

（data structure）　相互之间存在一种或多种特定关系的数据元素的集合。数据结构的形式定义为：数据结构是一个二元组 $DS=(D, R)$，其中 D 是数据元素的有限集，R 是 D 上关系的有限集。若在数据结构的定义

中出现本身的名，则称为递归的结构。数据结构的概念是N. 沃思（N. Wirth）和C. A. R. 霍耳（C. A. R. Hoare）在1966年首先提出的。在传统的程序设计语言中，定义数据结构的基本途径是采用数据类型。在面向对象的程序设计语言中，根据抽象数据类型理论，程序是将数据结构的逻辑结构和它的运算操作在一起定义的，并封装成一个整体。

根据不同的方法，可构造不同的数据结构。在程序设计中常用的数据结构有：表结构、树结构、图结构和文件。①表结构：包括线性表、栈、队列、字符串、数组等。结构中元素之间存在一对一的关系，依次排列形成一条“锁链”。②树结构：结构中元素之间存在一对多的关系，具有分支、层次特性。③图结构：结构中元素之间存在多对多的关系，任何两个元素都可以邻接。④文件：文件中任何两个元素间都没有逻辑关系，组织形式松散。

每一数据结构都有逻辑的和物理的两个侧面。数据结构的逻辑描述，称为数据的逻辑结构；数据在物理介质上的表示，称为物理结构或存储结构。

数据结构按其状态特性可分为静态和动态两类。静态结构是在整个使用期间其大小保持不变的数据结构，而动态结构是在程序执行过程中大小有变化的数据结构。

shujuku guanli xitong

数据库管理系统 （database management system，DBMS） 建立、使用和维护数据库系统的一组通用软件。它一般是由计算机厂商出售的商品软件。用于实现有组织地、动态地集中存储大量关联数据，方便多用户的访问。

数据库管理系统的组成和功能：①数据库描述语言：用于定义和控制数据库；②数据操作语言：用于对数据库进行操作时编写应用程序；③数据库控制程序：执行对数据的安全、保密、完整性的描述与检验，控制用户的并发性访问，协调整个数据库系统运行；④数据库维护程序：用于装入数据、监视、统计、记录数据库的运行，应用户要求或系统设备变化时修改和更新数据库，对数据库作备份及故障恢复等。

由于可以分别采用网状、层次和关系数据模型的原理和方法设计软件，因此相应地构成网状、层次和关系的数据库管理系统。较早的DBMS都处理成网状或层次的格式化模型。1968年IBM公司制成的IMS系统（层次模型结构）和1969年的数据系统语言协会（CODASYL）数据库任务组（DBTG）提出的报告“网络模型结构”就是典型的代表。1970年IBM公司的E. F. 科德提出了关系模型的概念，从而出现关系数据库管理系统，已有许多产品面世，如Sybase、Oracle、Infomix、IBM DB2通用数据库、My SQL等，并获得广泛的应用。

shujuku xitong

数据库系统 （database system） 以计算机软、硬件为工具，把数据组织成数据库形式并对其进行存储、管理、处理和维护数据的信息处理系统。其组成为：①数据库管理系统：建立和操纵数据库的软件；②数据库：存储和管理某系统或专题的大量关联数据；③应用程序：对数据进行查询、增加、修改、删除等操作的程序包；④人员：数据库管理员（database administrator，DBA）是数据库管理机构中拥有最高数据库用户特权的一组人员，对数据库系统进行全面管理。

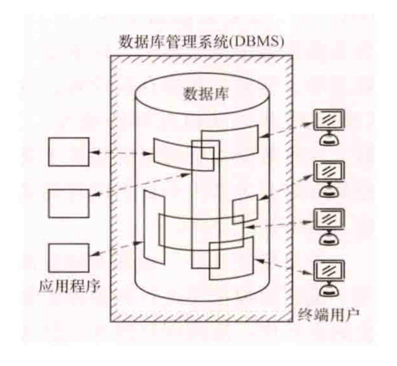


图1 数据库系统示意图

按处理范畴划分，数据库系统分为事务处理、图形处理和工程数据库系统等。狭义的数据库系统是指应用最广的事务处理系统。简化的数据库系统示意图如图1所示。

数据库系统设计过程 分四步：①根据专题要求，确定计算机的机型和存储容量，选取适当的数据库管理系统；②对专题数据和要求进行整理和分析归纳，按照数据库管理系统的要求建立数据模型，用模式描述语言对该模型进行描述使成为数据库模式；③以上述模式为框架，输入欲存储之数据，建立数据库；④编写用户所要求的对数据库操作的应用程序。数据库系统设计过程流程图如图2所示。

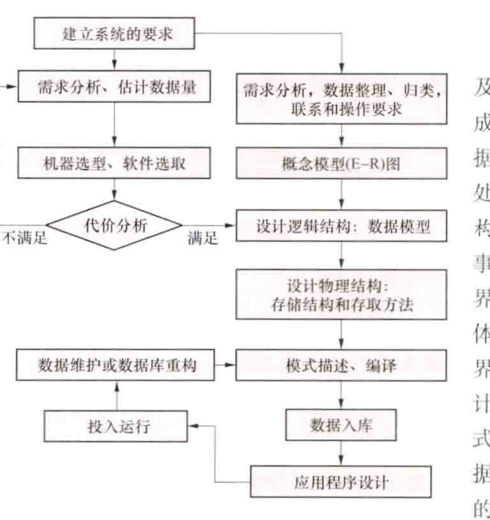


图2 数据库系统设计过程流程图

数据模型 把客观事物及其联系表示成可供某种数据库管理系统处理的数据结构形式。客观事物在信息世界中称之为实体。在机器世界中，属性的计算机数据形式表示称为数据项。数据项的联合说明了某个个体，在计算机中称为记录类型。记录类型内各个数据项的值的联合称为记录值，简称为记录。它反映了实体中某个个体的情况。记录类型之间的联系反映了实体间的联系，记录类型之间和记录类型内的数据项之间的联系用数据模型描述，它表示数据的组织结构，分为层次数据模型、网状数据模型和关系数据模型。

数据库逻辑设计 对专题的需求进行调查分析后，用实体-联系图（entity relationship diagram，E-R）表示，构成概念数据模型。逻辑设计的任务是把概念数据模型转变成等价的适应于特定数据库管理系统的逻辑数据模型。从概念模型到逻辑模型，以及层次、网状、关系三种数据模型之间的相互转换均已有规则和算法。对逻辑数据模型的性能评价和优化也有某些方法可选用，并有相应的软件工具。

数据库物理设计 根据特定的数据库管理系统提供的存储方法和存取策略，选取最适合应用要求的物理构造过程。

主要功能：①对数据库和库内各记录类型确定数据存储结构。包括是否应建立 Hash 结构，是否建立 B 树（balanced tree）等。②建立数据库多个入口点和各种存取路径。包括为某些数据项建立索引、次索引，对不同数据文件增加指针联系等。③确定数据存放位置。包括把数据库分成几个部分（域），哪些记录值在哪些域等。④确定外存划分和存储参数。有些数据库管理系统提供了物理参数选择项，包括确定把外存划分为若干个命名的存储区域、溢出空间大小、块长度、缓冲区大小等。

应用程序设计　根据专题应用要求，采用数据操作语言等，编制对数据库进行各种操作程序的过程。在有子模式概念的系统中，应用程序涉及的仅为数据库的局部，因此首先须对用户的局部数据结构建立子模式，然后针对子模式编制应用程序。

数据库　长期存在计算机内，有组织、可共享的数据集合。数据库中的数据按一定的数据模型组织，描述和存储，冗余较小、数据独立性较高、易扩展，可为各种用户共享。依照不同的数据模型，有网状数据库、层次数据库和关系数据库之分。数据库是数据库系统的重要组成部分，图 3 示出数据库系统的体系结构。

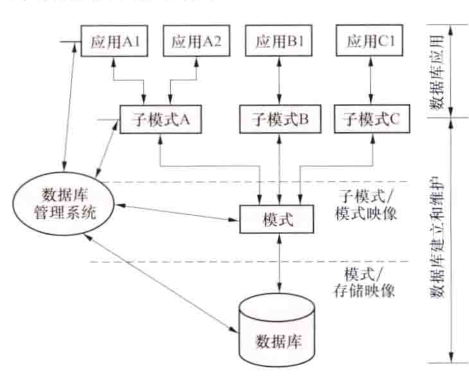


图 3　数据库系统的体系结构

研究课题与发展方向　数据库技术是计算机软硬件技术的一个重要分支，是 20 世纪 60 年代末迅速发展起来的一门新兴学科，其研究课题与发展方向主要有以下几个方面：①数据库系统的设计。在现有数据库管理系统的基础上，针对专题要求设计一个结构合理、效率较高、操作方便的数据库系统。具体的课题包括：数据库设计方法学和软件工具的设计，运用软件工程原理指导系统设计，关系数据库规范化理论的深入研究及用它指导逻辑设计等。②数据库管理软件的设计。指研究和设计新型的、具有更强功能和更高效率的、方便用户的系统软件。研制重点之一是关系型数据库管理系统，特别是查询的优化、并发控制和效率。另外还有对数据库系统标准化的探讨等。③在办公自动化方面数据库技术的应用，主要研究各种非规格化的数据（文本、图形、符号、声音等）的存储和处理，以及方便办公人员的终端接口。④数据库系统技术应用于计算机辅助设计（computer aided design，CAD）系统、工程数据库、图形数据库的研究。⑤新型数据库系统的研究。主要有面向对象数据库、智能数据库、特种数据库（主动数据库、模糊数据库、时态数据库、空间数据库、时空数据库、多媒体数据库、实时数据库、内存数据库）等。⑥分布式数据库的研究。随着分布式计算机系统和网络技术的发展，迫切需要进行分布式数据库系统的研究与开发。⑦研制数据库计算机，设计专门用于完成数据库管理系统中的部分或全部功能的新型计算机系统。采用联想处理机、联想存储器、多处理机等快速数据处理装置，以提高数据库系统的性能。另外，数据仓库与数据挖掘技术是最新应用研究的热点，可作为决策支持系统（decision support system，DSS）的一种有效并可行的解决方案。

shujuku xitong baohu

数据库系统保护　（database system protection）

保护数据库系统的安全和完整，使之具有随时可正常运转，并防止机密数据泄露的系统自我保护功能。通常是由数据库管理系统提供工具，由数据库管理员和用户进行定义来实现的。这种保护不涉及物理和法律方面的因素，而主要指数据库系统的安全性、完整性、并发控制和故障恢复方面的问题。

（1）安全性。为保护数据而具有的防御能力。用以防止对数据未经授权的泄露、修改或对数据的有意无意的破坏。数据库系统本身为数据安全提供如下措施：①为管理者提供授权手段，且允许对用户进行分类而授予不同的访问权，以控制对数据库的访问。②采取设置口令等方法，当用户进入系统时进行安全性检查。③在日志中记录对数据的使用情况。④采取视图等方法对部分数据隐蔽及对数据进行加密等。

（2）完整性。数据库中数据的准确性、正确性与有效性。数据完整性根据它要求的内容可以分成不同种类。如关系数据库中的域完整性规定了域的取值范围，实体完整性要求元组的主码值不为空且在所属关系中唯一，参照完整性则要求当一个元组的外键码值不为空时，以该外键码值作为主码值的元组必须在相应关系中存在。数据库的完整性是通过数据库管理系统提供定义完整性约束条件的功能和检查完整性约束条件的方法来实现。

（3）并发控制。并发程序系统中用于保证多个程序正确存取共享资源的机制。在数据库系统中指的是当多个事务并发运行时，对防止数据不可重读、读脏数据和丢失修改的不一致性的控制，由系统提供的并发控制程序完成。集中式数据库系统中大多采用加封锁的技术。分布式数据库系统中的并发控制问题更为复杂，除采用加锁技术外，还有时间邮戳、乐观算法等。

（4）数据库恢复。由于各种意外故障、人为错误使得数据库系统的数据遭到破坏时，系统所具有的强有力的应急、抢救措施，能使数据库恢复到出错以前的某一正确状态。这一正确状态指数据库中数据满足所有完整性约束条件。不同的数据库管理系统采用不同的故障恢复方法，但这些方法的原理都是采用冗余技术来达到故障恢复的目标。

shujuku yuyan

数据库语言　（database language）

用以建立、操作、控制和维护数据库的计算机语言。它是数据库管理系统的重要组成部分，也是系统与用户的直接界面。它包括数据描述语言（DDL）和数据操作语言（DML）两大部分，有的系统把两部分结合在一起，有的系统则从描述语言中独立出数据控制语言。

数据描述语言　用于定义和控制数据库的语言。描述数据库全局逻辑数据模型和约束条件的语言称为模式描述语

言，描述的对象称为模式。有的还增加控制用户的存取权和控制数据的完整性等描述。描述数据库物理特性和实际存储方式，即用作物理设计的语言称为存储描述语言。有的系统把两者统一在一起。描述数据库局部逻辑结构的语言称为子模式描述语言。模式描述语言有独立的文本、语法和编译系统。子模式描述语言和相应的应用程序设计语言有相容的语法。

数据操作语言　用于对数据库进行操作时编写应用程序的语言。它是数据库管理系统的一部分，是应用程序与数据库之间的软件接口，是应用程序员用存储、检索、修改、删除等对数据库中数据进行操作的工具。从语言的使用形式区分，它可分成自含型和宿主型两种。自含型语言可以独立写应用程序，有其相应的编译或解释系统。宿主型语言以其他程序设计语言（COBOL 语言，C 语言等）为宿主语言，数据操作语句仅能嵌在其中而组成应用程序。

不同的数据库管理系统均提供相应的数据库语言。其中结构化查询语言（structured query language，SQL）是国际标准化的数据库语言，包括查询、操纵、定义和控制四种功能。

shuju leixing

数据类型

（data type）　程序设计语言中所定义的具有相同数学特性和相同操作集的数据集合。变量被定义为某一数据类型时，对应的数据集合即为该变量的值集。

程序设计中常用的数据类型可分为两大类：简单类型和复合类型。①简单类型：其数据的结构非常简单，甚至是无结构的。包括整数型、实数型、字符型、逻辑型、枚举型、子界型和指针类型等。②复合类型：其数据由简单类型或复合类型的数据组合而成，包括数组、字符串、集合、记录、文件等。

在各种高级程序设计语言中，常根据语言本身的特点，内部定义数据的若干简单类型和复合类型，用户可以直接使用。此外，某些高级语言还提供用户自己定义数据类型的机制，以增强语言的功能。

使用数据类型概念的程序中，每一个变量、常量或表达式的值，都属于确定的数据类型。变量的值域以及所容许的操作，都由数据类型在程序中显式或隐式地规定。可利用类型概念提高数据的抽象表示能力，防止和发现程序中的某些错误，提高程序的可靠性、可读性和可维护性。

shuju moxing

数据模型

（data model）　对现实世界数据特征的抽象，用来描述数据、组织数据和对数据进行操作。

组成　数据模型由数据结构、数据操作和数据（完整性）约束三部分组成。

数据结构　主要描述数据的类型、内容、性质以及数据间的联系等。数据结构是数据模型的基础，数据操作和约束都建立在数据结构上。不同的数据结构具有不同的操作和约束。

数据操作　主要描述在相应的数据结构上的操作类型和操作方式。

数据约束　主要描述数据结构内数据间的语法、词义联系、他们之间的制约和依存关系，以及数据动态变化的规则，以保证数据的正确、有效和相容。

类型　数据模型应满足三方面要求：一是能比较真实地表示现实世界，二是容易为人所理解，三是便于在计算机上实现。为此，需要使用不同的数据模型：概念模型、逻辑模型和物理模型。

概念模型　也称信息模型，是现实世界到信息世界的抽象，是按用户的观点来对数据和信息建模，用来描述现实世界的概念化结构。

在概念模型中最常用的是实体-联系（entityrelationship，E-R）模型。实体是客观存在并可相互区别的事物。联系反映为实体（型）内部的联系和实体（型）之间的联系，实体内部的联系是指组成实体的各属性之间的联系，实体之间的联系是指不同实体之间的联系。

逻辑模型　是按计算机系统的观点对数据建模，主要用于数据库管理系统（database management system，DBMS）的实现。常用的逻辑模型有层次、网状和关系模型，最常用的是关系模型。随着面向对象技术的发展，一些关系 DBMS 为了支持面向对象，对关系模型做了扩展，从而产生了对象关系模型。

（1）层次数据模型。用树型结构表示实体以及实体间的联系，是满足下面两个条件的基本层次联系的集合：①有且只有一个结点没有双亲结点，这个结点为根结点；②根以外的结点有且只有一个双亲结点。

（2）网状数据模型。用网状结构表示实体以及实体间的联系。满足下面两个条件的基本层次联系的集合为网状模型：①允许一个以上的结点没有双亲结点；②一个结点可以有多于一个的双亲结点。

（3）关系数据模型。由一组关系组成，E-R 模型中的每个实体和联系皆用关系来表示，每个关系的数据结构是一张规范化的二维表。

层次、网状和关系模型的数据操作主要有查询、插入、删除和更新，进行数据操作时要分别满足层次、网状和关系模型的数据（完整性）约束条件。

物理模型　描述了数据在计算机内存储介质上的组织结构和存取方法，其实现是 DBMS 的任务，数据库设计员要了解和选择物理模型，通常只设计索引等特殊结构，一般用户不必考虑物理级的细节。

shuju wajue

数据挖掘

（data mining）　采用数学、统计、人工智能和神经网络等方法，从大量数据中发现有潜在价值的关系、模式和趋势的过程。数据挖掘用这些知识和规则建立用于决策支持的模型，为各业务领域提供预测性决策支持的方法、工具。

分类　根据模型功能的不同，主要分为描述型数据挖掘和预测型数据挖掘两类。

描述型数据挖掘　根据数据的相似性把数据分组，或对数据中存在的规则进行描述，包括聚类分析（cluster analysis）、关联分析（association analysis）、异常检测（anomaly detection）等。聚类分析旨在发现紧密相关的观测值群组，属于同一簇的观测值相互之间尽可能相似；关联分析用来发现描

述数据中强关联特征的模式；异常检测的任务是识别其特征明显不同于其他数据的观测值。描述性数据挖掘通常是探查性的，常常需要后处理来完成验证和解释结果。

预测型数据挖掘　根据其他数据属性的值，预测特定属性的值。被预测的属性通常称为目标变量或因变量，而用来做预测的属性称为说明变量或自变量。预测性数据挖掘包括分类（classification）、回归（regression）等，其中分类用来预测离散的目标变量，回归用来预测连续的目标变量。

技术方法　数据挖掘是一个交叉学科，其发展伴随着机器学习、统计学、数据库技术等多个领域的进步，数据挖掘的很多方法和技术都是由人工智能、机器学习的方法发展而来。以数据库、数据仓库为研究对象，结合传统的统计分析、模糊数学、科学计算和可视化技术完成数据挖掘。常见的数据挖掘方法包括决策树、神经网络、支持向量机、遗传算法、关联分析等。

决策树　利用信息论中的互信息（信息增益）寻找数据库中具有最大信息量的字段，建立决策树的一个节点，再根据字段的不同取值建立树的分支；在每个分支子集中，重复建立树的下层节点和分支的过程，即可建立决策树。国际上最有影响和最早的决策树方法是 Quinlan 提出的 ID3（迭代二叉树 3 代，iterative dichotomiser 3）算法，数据库越大它的效果就越好。

神经网络　通过学习待分析数据中的模式来构造模型，它可对隐式类型进行分析，适用于模型化非线性的、复杂的或高噪声的数据。通常，神经模型由三个层次组成：输入层、中间层和输出层。

支持向量机　是一种基于统计学习理论的模式识别方法，该方法可以有效解决有限样本、非线性及高维模式的识别问题，现已成为机器学习和数据挖掘领域的标准工具。支持向量机方法涉及最优超平面，Mercer 核、最优化理论、稀疏解和松弛变量等多项理论和技术。

遗传算法　一种模拟生物进化过程的算法，由三个基本算子组成：繁殖、交叉（重组）和变异（突变）。遗传算法已在优化计算和分类机器学习方面发挥了显著作用。

关联分析　如果两个或多个事物之间存在一定的关联，那么其中一个事物就能通过其他事物进行预测。它的目的是为了挖掘隐藏在数据间的相互关系，从中寻找重复出现概率很高的模式或规则。

发展　随着现代互联网、物联网应用的普及，数据朝着海量、高维、动态的方向发展，对大数据以及流数据进行快速处理，从而使各类数据（结构化、半结构化和非结构化数据）发挥最大的价值是数据挖掘技术发展的趋势。

大数据　云计算作为一种新兴的计算模型，具有扩展性好、数据处理规模大、容错计算能力强等特点，可利用云计算的并行数据处理技术，将同一数据挖掘算法分布在多个节点运行，或是多个算法之间并行进行，实现大数据的并行挖掘与服务。

流数据挖掘　数据以一个或多个流的方式到来，如果不对其进行及时的处理或存储，数据将消失。对单数据流的挖掘涵盖了分类、频繁模式分析和聚类等多项数据挖掘任务，对多数据流的挖掘主要是关联分析，目标是挖掘多条并行到达的数据流之间的关联关系。

参考书目

Pang-Ning Tan，Michael Steinbach，等．数据挖掘导论．范明，范宏建，等译．北京：人民邮电出版社，2006.

Anand Rajaraman，Jeffrey David Ullman，等．大数据：互联网大规模数据挖掘与分布式处理．王斌，等译．北京：人民邮电出版社，2012.

shumo zhuanhuanqi

数模转换器

（digital to analog converter）　将数字量转换成模拟量的器件，简称 DAC 或 D/A。数模转换是模数转换的逆过程，即从数字式编码信号变换为对应的模拟信号。它在通信、计算机、自动化技术及测量仪器等领域中得到广泛应用。

工作原理　数模转换器基本上由 4 个部分组成：权电阻网络（或权电流网络）、模拟开关、求和电路和基准电源。图 1 为倒 T 型电阻网络组成的四位并行数模转换电路，它是按二进制数“权”位转换成相应的模拟量后相加而得。所谓“权”是指任意进制数的每一位所代表的值。图 1 中，并行输入的二进制数码 $D_0 \sim D_3$ 分别驱动所对应的开关 S0～S3，用来控制运放 N 输入端 Σ 点接通的 $2R$ 支路数，以产生相对于输入数字量的电流值，然后通过运放 N 输出相应的电压 U_o。设输入数字量为 1001，其对应的开关 S0、S3 接到运放 N 的输入端，S1、S2 接地，若参考电压 U_R 提供的电流 $I = 2^4 I_0 = U_R/R$，则

$$I_\Sigma = 8I_0 + I_0 = 9I_0,\ U_o = -9I_0R = -9U_R/2^4$$

I_Σ 与数字量成正比，即得到的求和模拟电流与输入数字量 $(1001)_B = 9$ 相对应，图中的运算放大器将电流转换为模拟电压输出。图 2 为四位二进制数模转换特性。

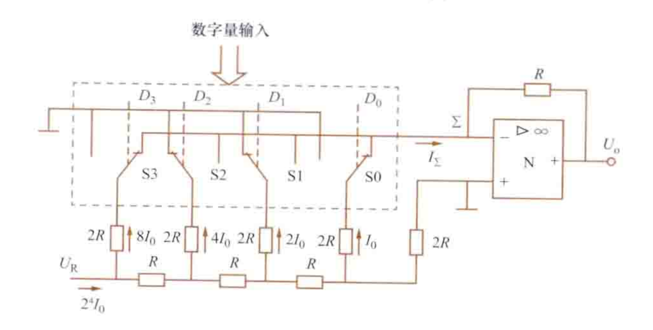


图 1　数模转换原理电路

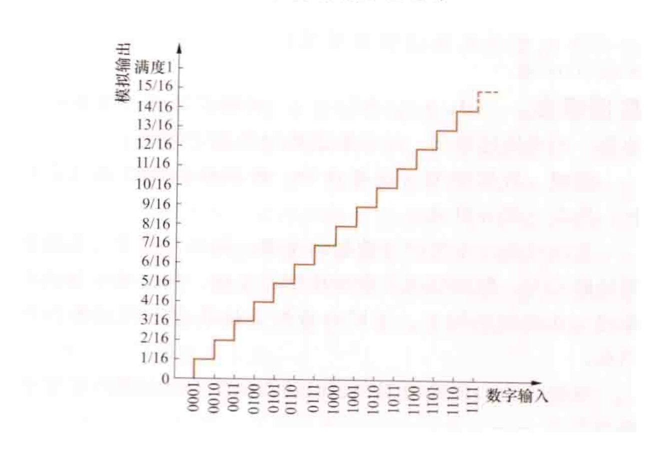


图 2　数模转换传输特性

电路特点　倒T型电阻网络的特点：①倒T型电阻网络中电阻的品种少，差值小（为 R 和 $2R$），因而集成化容易实现，精度易保证。②模拟开关切换过程中，各权电阻支路的电流不变，减小了电流建立时间，并减小了转换过程中的尖峰脉冲，提高了倒T型电阻网络DAC的转换速度。

技术指标　DAC的主要技术指标有转换精度和转换时间。

（1）转换精度：由分辨率和转换误差来决定。①分辨率是指单位量化电压与最大输出电压之比，n 位DAC分辨率为 $1/(2^n-1)$。分辨率通常也用DAC的二进制数码位数 n 来表示分辨率，位数 n 越大，分辨能力越高。②DAC转换误差是指实际输出模拟电压值与理想值的最大偏差。主要由非线性误差、漂移误差和增益误差构成。非线性误差一般是由于模拟电子开关的导通电阻和导通压降及 R、$2R$ 电阻值的偏差引起。漂移误差一般是由于运算放大器的零点漂移引起。增益误差一般是由于参考电压偏离标准值、运放增益不稳定引起。

（2）转换时间：从输入数字代码全0变为全1瞬间起，到DAC输出的模拟量达到稳定值的规定误差带内止，所需要的时间间隔。

shuxue guihua

数学规划

（mathematical programming）　根据问题对决策变量的约束条件，寻求变量值使一个或多个给定函数取得极小或极大值的一个数学分支。数学规划一般可以抽象为如下形式的数学模型

$$\max f(x_1,x_2,\cdots,x_n)$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} g_i(x_1,x_2,\cdots,x_n)\leqslant 0, i=1,2,\cdots,m \\ h_j(x_1,x_2,\cdots,x_n)=0, j=1,2,\cdots,l \end{cases}$$

其中，f 为目标函数；$g_i(i=1,2,\cdots,m)$ 为不等式约束条件；$h_j(j=1,2,\cdots,l)$ 为等式约束条件；$x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为决策变量。满足约束条件的变量 $x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 称为问题的可行解，其值集 D 称为问题的可行解域。数学规划主要研究的是寻求 $x^*\in D$，使得 $f(x^*)\geqslant f(x)$ 对一切 $x\in D$ 都成立，x^* 称为问题的最优解。

将数学方法用于生产规划的思想，在19世纪或更早以前就已萌生。20世纪40年代以后，由于现代大规模生产及其管理的需要，加上计算机的高速运算功能，促进了数学规划的发展并取得广泛的应用。根据问题的性质和处理方法的差异，数学规划形成许多不同的分支，包括线性规划、非线性规划、整数规划、组合规划、动态规划、多目标规划、几何规划、随机规划、模糊规划等。

shuxue moxing

数学模型

（mathematical model）　控制系统的变量之间相互关系和变化规律的数学描述。它把系统中现象的分析归结为某种形式的数学问题。变量之间的关系可以用公式（包括代数方程、微分方程、差分方程、传递函数等）表示，也可以用表格或图形表示，它们都是数学模型的表现形式。数学模型分为静态模型和动态模型。静态模型描述各有关变量在静态情况下的关系，可以用代数式表示。动态模型描述各有关变量在动态过程中的关系，连续系统常用微分方程，离散系统常用差分方程以及其他适当的方式表示，代数方程不能作为动态模型。在建立数学模型时，要兼顾模型的简化和结果的准确性。应该根据课题的要求来确定数学模型的简化程度，要力求简化，但必须满足课题的要求。

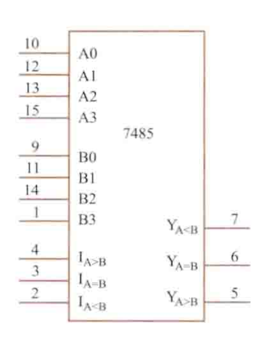
用微分方程和传递函数作环节和系统的数学模型的例子见环节和传递函数。

shuzhi bijiaoqi

数值比较器

（magnitude comparator）　数字系统和计算机中，比较两个二进制数大小的器件。完成比较功能的逻辑电路称为数值比较电路。

4位数值比较器7485的图形符号如图所示，A3～A0、B3～B0是相比较的两个4位二进制数的输入端，$Y_{A<B}$、$Y_{A=B}$、$Y_{A>B}$是比较结果输出端，$I_{A<B}$、$I_{A=B}$、$I_{A>B}$是级联输入端，用于扩展多于4位的两个二进制数的比较。



4位数值比较器7485的图形符号

表是7485的逻辑功能表，由表可见，两个多位数相比较时，从高位到低位逐位比较，如最高位不相等，可立即判断两个数值的大小；如果最高位相等，则需比较次高位，依此类推，直到最低位。

4位数值比较器7485逻辑功能表

比较输入				级联输入			输出		
A_3B_3	A_2B_2	A_1B_1	A_0B_0	$I_{A>B}$	$I_{A<B}$	$I_{A=B}$	$Y_{A>B}$	$Y_{A<B}$	$Y_{A=B}$
$A_3>B_3$	×	×	×	×	×	×	1	0	0
$A_3<B_3$	×	×	×	×	×	×	0	1	0
$A_3=B_3$	$A_2>B_2$	×	×	×	×	×	1	0	0
$A_3=B_3$	$A_2<B_2$	×	×	×	×	×	0	1	0
$A_3=B_3$	$A_2=B_2$	$A_1>B_1$	×	×	×	×	1	0	0
$A_3=B_3$	$A_2=B_2$	$A_1<B_1$	×	×	×	×	0	1	0
$A_3=B_3$	$A_2=B_2$	$A_1=B_1$	$A_0>B_0$	×	×	×	1	0	0
$A_3=B_3$	$A_2=B_2$	$A_1=B_1$	$A_0<B_0$	×	×	×	0	1	0
$A_3=B_3$	$A_2=B_2$	$A_1=B_1$	$A_0=B_0$	1	0	0	1	0	0
$A_3=B_3$	$A_2=B_2$	$A_1=B_1$	$A_0=B_0$	0	1	0	0	1	0
$A_3=B_3$	$A_2=B_2$	$A_1=B_1$	$A_0=B_0$	0	0	1	0	0	1

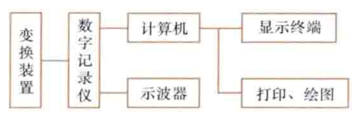
shuzi celiang xitong

数字测量系统

（digital measuring system）　由计算机程序控制，对模拟信号波形进行定时采集，并将其量化为数字信号予以计算、存储、处理、显示和输出的一种具有综合功能的测量系统。它用于各种稳态、暂态信号的测量，对一次过程暂态信号的观测尤为方便。数字测量系统广泛应用于各种工程技术、生物医学、原子物理、军事科学等领域，应用前景十分广阔。

组成　原理框图如图所示。变换装置为各种传感器、分

压器或分流器。数字记录仪是系统的关键部件，它利用模数转换器将输入模拟信号波形按内部时钟控制的时间逐点量化为数码，存入寄存器，或通过接口将数码直接输出到计算机，也可通过数模转换器将数码重新转换为模拟信号输出到示波器。为便于显示输出波形，有些数字记录仪和示波器组合成一台仪器，这类仪器通常称为数字存储示波器。计算机是系统完成控制、计算、处理和存储的核心部件。测量结果可在终端设备上显示，也可由打印机或绘图仪输出。



数字测量系统组成框图

主要技术性能　表征数字测量系统基本特性的指标有：①量化位数 N 或额定分辨率 $r=1/(2^N-1)$。常用的位数为 8～12 位，相应的额定分辨率则为 0.4%～0.1%。②采样率 f_S 或采样周期 $T_S=1/f_S$。常用的采样率范围很广，可从每秒几个采样点到每秒几千兆个采样点，最高可达 10^5M 个点；若用采样周期表示，则为若干毫秒、微秒、纳秒、皮秒等。③记录长度 W 和内存容量 M。W 为数字记录仪每一通道单次记录的总字数，常用的为几百字到几百千字。M 是数字记录仪内可存储的总字数，一般为记录长度的 1 倍至几倍。除此之外，与通常的模拟测量仪器一样，还具有测量频带、测量通道数等技术性能。

优点　由于采用计算机和数字化技术，数字测量系统具备传统模拟测量系统难以实现的一些优异功能，如：①信号存储和记忆。利用存储器可保存多次测量的大批数据，并可任意调用。②信号处理和分析。应用数字信号处理方法可避免人为读数误差，减小量化过程的各种误差及内部噪声和外部干扰的影响，提高测量准确度。③遥控、遥测及测试自动化。利用数字信号和指令便于传送的特点，可由计算机按工作程序进行控制和数据传送。④记录触发前过程。给定数字记录仪的预触发量，便可取得预定的触发前信号变化的情况。⑤一次记录过程中可改变采样速度。某些数字记录仪具备这种功能，以便充分利用寄存器容量，有选择地延长或缩短被测信号的记录时间长度。

shuzi cunchu shiboqi

数字存储示波器　(digital storage oscilloscope)　以数字序列形式记录一条或多条瞬时变化的电位差曲线，且能在示波管荧光屏上显示的仪器。如希望用它显示其他瞬时变化的物理量，应事先转换为瞬时变化的电位差信号。

数字存储示波器既具有存储功能，又具有实时观测能力。用于实时观测时，其功能与普通示波器（见阴极射线示波器）相同。被测模拟信号经调理（衰减或放大）并由 A/D 转换器变换成数字量后，被写入存储器 RAM，并在需要时从 RAM 中取出，显示在屏幕上。

除存储被测时域信号和显示其波形外，数字存储示波器还能对被测信号进行直读波形及其参数（包括波形的平移、放大、缩小和游标读数），压缩、滚动显示、延时触发，快速傅里叶变换、相关分析、卷积计算等运算处理，且能程控或遥控测量过程；并能以数字形式显示各种给定值和被测对象的特征值，观测触发前的信号，观测单次信号尤为方便，而且观测慢变信号时无闪烁现象。有的数字存储示波器采用游标读取测量值，可明显减小人为因素以及由示波管和放大器的非线性造成的误差，使测量准确度优于 1%。有的数字存储示波器带数字通信接口，可将被测信号送至计算机完成更复杂的运算或处理，或参与组成自动测试系统。数字存储示波器多具有功能“菜单”，它是传统示波器操作面板上控制键和调节旋钮功能的软件化实现，借助它，能方便选择仪器功能并操作示波器。

依托数字信号处理技术与计算机一起构成智能测试系统，使数字存储示波器适用于对复杂单次瞬变信号的记录、存储、分析及研究。随着新的模数转换技术的出现和扫描变换技术的进步，数字存储示波器的功能与性能还将不断提高。

数字存储示波器的一般性能，见数字测量系统。

shuzi dianlu

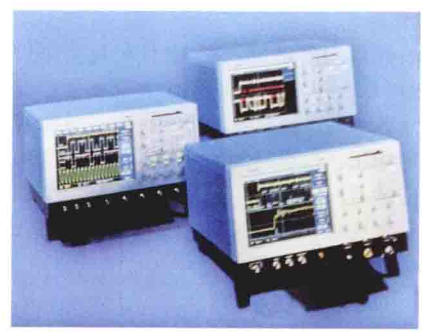
数字电路　(digital circuits)　处理数字信号的电子电路。数字信号，是指时间上及数值上都是离散的（不连续的）信号。一方面，它们的变化在时间上是不连续的，总是发生在一系列的瞬时；另一方面，它们的数值大小和增减变化，都是不连续的数值。

数字电路中的电子器件一般工作在开关状态，电路中的电压或电流通常只有两个状态：高电平或者低电平；有电流或者无电流。这样的两个状态可用 0 和 1 表示，0 和 1 既可以表示数字量，也可以表示逻辑量。数字电路输入与输出的 0、1 序列间的逻辑关系便是数字电路的逻辑功能，因而数字电路亦可认为是实现各种逻辑关系的电路，故数字电路又称为数字逻辑电路。

数字电路可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路，组合逻辑电路的基本单元是门电路，时序逻辑电路的基本单元是触发器。

数字电路的优点：①电路结构简单，容易制造，便于集成和系列化生产，成本低，使用方便。②由数字电路组成的数字系统，抗干扰能力强、可重复性和稳定性好。③数字电路容易分析和设计。④数字信息便于采用计算机进行运算、处理、存储等。

随着大规模及超大规模数字集成电路的飞跃发展，数字电路在各个领域都得到越来越广泛的应用。可编程逻辑器件代表了数字电路的一个发展方向，硬件描述语言成为现代数字电路设计的主要描述方式。图为调试数字电路系统的常用工具之一——逻辑分析仪。


TLA600 系列逻辑分析仪

shuzi dianyabiao

数字电压表　(digital voltmeter)　应用模数转换技术，测量直流电压并以数字显示的电表。

数字电压表的种类很多，具有测量准确度高、分辨力强、输入阻抗高、测量速度快、功能强（自动极性选择、超

量程指示、过载保护等)、便于提供数码形式输出等优点，已基本取代了模拟式电压表。数字电压表应用广泛，对许多非电参数的测量，均通过传感器先将其变换成电压信号，再借助数字电压表实现对它们的测量。

数字电压表包含两个基本功能部件，即模数转换器和数字显示器。模数转换器是数字电压表的核心，被测直流电压通过它转换成等值的数码值，再由数字显示器给出电压值。

按实现模数转换原理的不同，数字电压表可分为积分型和逐位逼近型两大类。积分型最常用，其基本特点是对被测电压 U_X 进行积分。

U-T 型双斜积分型数字电压表的原理框图如图 1（a）所示。它先对被测电压 U_X 进行定时积分，积分时间为 T_1，积分输出电压沿斜线变化如图 1（b）所示。然后切换积分器输入电压，对基准电压 U_R 进行所谓定值积分，积分输出

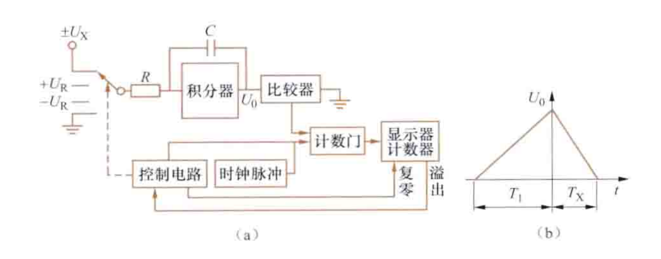


图 1　双斜积分型数字电压表

(a) 原理框图；(b) U_0 随时间变化图

按给定斜率作反向斜线变化，直到积分器输出为零［见图 1(b)］。按一次转换过程中积分电容上电荷平衡原理，可得到 $T_X=(T_1/U_R)U_X$，其中 T_1、U_R 均为常数，T_X 为定值积分时间。因此，T_X 与被测电压 U_X 成正比。对 T_1 和 T_X 进行计数编码，可得到等效的数字值 $N_X=(N_1/U_R)U_X$。式中 N_1、N_X 为对应于 T_1 和 T_X 的脉冲数。

由于定时积分时间 T_1 选定为工频周期的整倍数，对叠加在被测信号上的工频干扰有很强的抑制能力，因此，这类电压表尤其适用于工频干扰较严重的生产现场。



图 2　数字电压表

图 2 为数字电压表外形图。

shuzi gonglübiao

数字功率表

(digital wattmeter)　通过变换器将所测功率变换成电压，再经模数转换并以数字显示功率值的电表。

根据功率表达式 $p(t)=u(t)i(t)$，将 $u(t)$ 和 $i(t)$ 输入到时分割乘法器中相乘，得到与功率 p 成正比的模拟电压 U_0；再将此电压经 $U-f$ 转换器变为频率，由频率表在一段时间 Δt 内计数 N，便可得到这段时间内的平均功率（见图 1）。时分割乘法器是将节拍方波 $\pm E_C$ 提供的周期 T 分割为 T_1 和 T_2，其时间差值 T_2-T_1 正比于 u_x，即 $T_2-T_1=\frac{R_2}{R_1}\times\frac{T}{U_R}\times u_x$，$U_R$ 为基准电压。

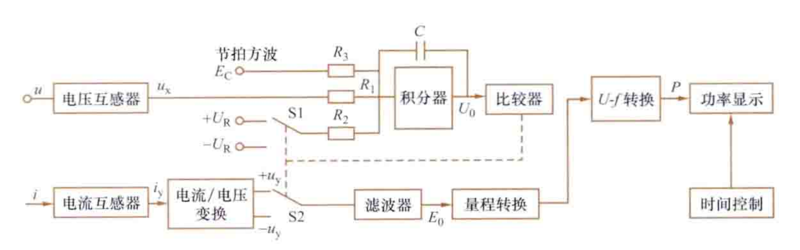


图 1　数字功率表原理框图

比较器输出同时控制开关 S1 和 S2，开关 S1 换接基准电压 $\pm U_R$，开关 S2 换接与被测电流成正比的方向相反、大小相等的电压 $\pm u_y$，当积分器输出 $U_0>0$ 时，即 T_1 期间，S1 接通 $+U_R$，S2 接通 $+u_y$；反之 $U_0<0$，即 T_2 期间，S1 接通 $-U_R$，S2 接通 $-u_y$，亦即 $\pm u_y$ 被开关 S2 所调制。于是在节拍方波一个周期 T 内，被调制输出的 $\pm u_y$ 经滤波后得到平均值 $U_0=\frac{u_yT_1}{T_1+T_2}+\frac{-u_yT_2}{T_1+T_2}=-\frac{T_2-T_1}{T}u_y$，或 $U_0=-\frac{R_2Tu_xu_y}{R_1U_nT}=K'_pu_xu_y$。由于 u_y 正比于电流 i_y，即 $u_y=R_yi_y$，则 $U_0=K'_pu_xi_xR_y=K_pu_xi_y$。由此可见，时分割乘法器是在一个节拍周期内作瞬间相乘。若节拍方波的周期很短，则 U_0 反映瞬时功率。设 $u_x=K_xU_m\sin(\omega t+\varphi)$，$i_y=K_yI_m\sin\omega t$，其中 K_x 为电压互感器或分压器的变换系数；K_y 为电流互感器或分流器的变换系数，则

$$\begin{aligned}U_0&=K_pK_xK_yU_m\sin(\omega t+\varphi)I_m\sin\omega t\\&=KUI\cos\varphi-KUI\cos(2\omega t+\varphi)\end{aligned}$$

式中后一项可通过滤波器滤掉，使 U_0 在数值上仅与节拍周期 T 内的有功功率 $UI\cos\varphi$ 成正比。



图 2　交流数字功率表

图 2 为交流数字功率表外形图。

shuzi pinlübiao

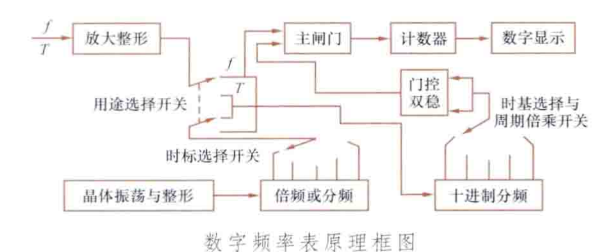
数字频率表

(digital frequency meter)　应用模数转换技术，测量频率（或周期、任意时间间隔），并以数字显示的电表，又称数字频率计。对频率、周期、时间间隔的数字化测量，通常采用在被测时间（或单位时间）内对电脉冲进行计数的方法。其中原理实现的共同部分是电子计数器。只要通过适当的组合，同一电路环节可用于测量频率、周期、时间间隔或频率比等参数。

频率是单位时间内周期性信号的重复次数，其数字表达式为 $f=N/t$。式中 f 为频率；t 为产生 N 次重复变化或电脉冲所需的时间。

数字频率表的原理框图如图所示。它由输入通道和计数器、时间基准电路、控制电路等组成。①输入通道和计数器。输入通道用来将各种被测周期信号（如正弦波、三角波、锯齿波等）放大整形后转换成周期性脉冲信号，在主闸门的控制下进入十进制计数器做计数。计数值由数字显示器

显示。②时间基准电路。这里，时间基准源于石英晶体振荡器，其输出经整形后形成矩形时钟脉冲，再经过一系列分频电路分频，得到不同时间基准，经时基选择开关选用。③控制电路。用来在所选择的基准时间 T_R 内将主闸门打开，允许整形后的被测周期性脉冲串通过，并送往计数器计数。设计数器读数为 N，则频率 $f=N/T_R$。



数字频率表原理框图

由于周期 T 与频率互为倒数，即 $T=1/f$，所以数字频率表也可用来测量周期。被测周期信号经放大整形后形成脉冲送给十进制分频器，经过周期倍乘开关送到主闸门，使主闸门仅在被测周期 T（或 n 倍周期 nT）时间内开启。石英晶体振荡器的输出信号经整形后形成周期脉冲序列，再经过分频或倍频，可得系列标准脉冲，即时标信号。该时标信号在主闸门开启时间 T 内，进入计数器做计数。设时标信号的周期为τ_0，计数器读数为 N，则被测周期$T=N\tau_0$。

shuzi tuxiang chuli

数字图像处理

（digital image processing） 利用计算机对数字化的图像进行加工的技术。借助于数字图像处理可得到符合人们某些要求的新图像或非图像信息，以便于人的理解以及机器的识别。这些要求是：改善图像质量，压缩冗余信息，提取特征信息和识别静止或运动目标。①改善图像质量，例如去掉图中噪声和干扰，增强图像反差，突出图中感兴趣的部分，恢复由于运动、存放年代久远或成像条件不佳等因素而降低了的图像质量；②压缩图像中的冗余信息，便于有效存储和传输；③提取图片中的特征信息并给予适当描述和表示；④识别静止或运动目标，检测变化，理解图片内容，使机器实现有视觉功能的智能控制或自主行动。

简史 数字图像处理的最早应用是在 20 世纪 20 年代，当时利用海底电缆成功地实现了纽约和伦敦之间的世界新闻图片的首次数字化传送；但直到 60 年代中期第三代计算机问世，才给图像处理算法提供了足够大的容量和速度。从太空探测到气象云图和核气泡室的图片分析，从地球资源卫星、航测到城市交通管理，从指纹分析、计算机层析学到细胞分裂研究，从文字识别、景物理解到机器人自主行动等无不用到数字图像处理技术，而且随着时间的推移、技术的发展，它的应用范围也将迅猛地扩大。

基本内容 数字图像处理的基本技术包括图像获取、图像数字化、图像增强和复原、图像编码与压缩、图像分割与表示、图像匹配与识别、三维物体重建、图像显示与硬拷贝、图像实时处理与理解等。解决这些理论与技术问题时需要有广泛的学科知识，如物理学、数学、生理学等。最常用的工具有线性系统理论、矢量代数、模糊数学、微分几何学和泛函、概率论和随机过程。处理的图像有黑白图像、彩色图像、红外线图像、多波段遥感图像、静止图像、时间序列图等。获取图像的方法可借助可见光、红外线、超声波、激光、雷达、声纳等种种成像原理。

图像获取 要获得一个数字图像必须将图像中的像素转换成数字信息，以便在计算机上进行处理和加工。将模拟图像转换成数字图像的工作，通常可由扫描仪来完成。扫描仪测量从图片发出或反射的光，依次记录光点的数值并产生一个彩色或黑白的数字拷贝。这个图像被翻译成一系列的数字后存储在计算机的存储器上（硬盘、光盘或闪存等）。一旦图像被转换成数字文件，它就能够被电子化地在计算机或网络中进行传输。

图像数字化 把原始的模拟图像在水平和垂直两方面上取样，并在灰度上量化，使成为适宜于计算机处理的数字化形式。数字图像是一个二维矩阵，每个阵元称为像元或像素，典型的像素阵列的大小为256×256、512×512 或更大。每个像素的灰度级一般为 6～8 位（bit）。也有用 1 位表示图像的，这叫二值化图。取样密度越大，灰度级越多，则包含的图像细节也越多，但占有的信息量也越大。实用中必须恰当选取这些数字化参数。

图像增强 用以改善图像的主观质量，而不一定追究引起图像降质的原因。直方图修正、强化图像轮廓、去除随机噪声和干扰等都是常用技术手段。由于接受者是人，所以图像质量的好坏就受观看者的心理、爱好、文化或专业素养的影响，评判只能是平均的、相对的。

图像复原 找出图像降质的起因，并尽可能消除这些起因，使图像复原或接近恢复到本来面目。常见的方法有纠正几何失真，去除运动模糊、条带干扰，降低图像噪声，如从图像的信号与噪声的统计值入手用维纳滤波来改善信噪比等。

图像编码与压缩 对图像进行编码的主要目的是为了压缩数据，便于存储和传输。图像压缩指用各种算法和编码方案，减少图像文件占用的存储空间，节省图像传输时间。图像压缩分无损压缩和有损压缩两类，前者能完全恢复原图像，后者有较高压缩比。有些良好的算法，对特定图像的压缩量可达到 100∶1 以上。如果人作为通信系统中的接受者（观看者），还可利用人的视觉特性如掩盖效应和人对灰度、色彩和空间分辨率的有限性等特点取得更大压缩比，而感觉不出图像质量的下降。对于时间序列图像（电视图像等），由于可利用帧间的相关性，采用帧间编码技术会进一步增大压缩比。利用对图像中感兴趣目标建立模型的方法，提取目标的参数进行编码，可得到更大的压缩比和较好的图像质量。

图像分割 从一幅图像中找出感兴趣的物体或有意义的区域。对人来说能方便地做到这一点，但要计算机做到这一点却很难，常要给它以某些测度和知识，如使它按图像的特征（灰度、颜色、纹理、连通性等），或按某些规则，如人的鼻子只有一个，长在眼睛下方和嘴的上方等，从而把一些感兴趣的物体有意义的区域从图像中划分出来，但一般说效果并不理想。常用的方法有阈值分割、边沿跟踪、区域生长、分裂和合并、知识基分割等。

图像表示 以适当的语言和数据结构来表示已分割物体或区域的结构特性、统计性质或诸物体之间的关系，得出一种简洁的表达方式，为计算机匹配识别做准备。图像表示的几种常用方法有轮廓表示方法、区域表示方法、几何特征表示方法、矩阵表示方法以及骨架结构表示方法等。

图像匹配与识别 又称景物匹配与识别，利用分割出的

图像或物体的形状、特征信息或分层表达的结构关系作基准，通过搜索、比较、匹配和推理，从景物中找出要识别的目标。景物匹配和识别是十分困难的问题，它涉及模式识别、人工智能、生理心理学等学科的交叉研究领域。视觉识别是人和动物的眼—脑系统的固有功能，是在长期进化中形成的。人的知识、经验能在其头脑中建立起庞大的知识库和推理能力，但指望用计算机来做到这点却十分困难，原因是直到今天对人的识别事物的机制还了解太少。人们只是给计算机编程序使它能"看"，而不是教给它最必需的知识使它学会"自己会看"，因此只能识别相对较简单的景物。常用的识别方法有相关法、结构匹配法、知识基的专家系统等。人们正通过进一步研究像计算机视觉、人工智能、神经网络等理论来改进和完善对图像的识别方法。

三维物体重建　根据单视图或者多视图的图像重建物体的三维信息。三维物体重建是计算机辅助几何设计、计算机图形学、计算机动画、计算机视觉、医学图像处理、科学计算和虚拟现实、数字媒体创作等领域的共性科学问题和核心技术。在计算机内生成物体三维表示主要有两类方法，一类是使用几何建模软件通过人机交互生成人为控制下的物体三维几何模型，另一类是通过一定的手段获取真实物体的几何形状。三维重建包括数据获取、预处理、点云拼接和特征分析等步骤。

图像显示与硬拷贝　数字化图像的再现离不开图像电子显示器和数字图像硬拷贝技术。图像显示是数字图像处理的最后一环。目前，主要有 4 种图像电子显示器：阴极射线管（cathode ray tube，CRT）显示器、液晶显示器（liquid crystal display，LCD）、等离子体显示器（plasma display panel，PDP）和有机电致发光图像电子显示器（又称有机发光二极管）。新一代场发射显示器——碳纳米管场发射图像电子显示器目前还在研发之中，这种显示器将能达到镜面影像效果。图像硬拷贝是将各种图像文件用打印机输出到胶片或打印纸上，实现数字图像硬拷贝的设备有激光打印成像机、全数字化激光成像机（又称波拉罗伊德阳光干片激光打印成像装置）和干银激光胶片热鼓显像机 3 种。

图像实时处理与理解　图像实时处理技术包括图像处理算法、实时图像处理系统、图像处理专用芯片、图像处理并行语言等。图像理解是指利用计算机从影像中提取被摄景物语义信息，以实现识别、分类和判读的过程。

为了开展数字图像处理的研究，单有计算机系统是完不成的，还需有进图装置、出图装置和图像处理软件包。常用的进图装置可以是 TV 摄像机、数码摄像机、数码照相机、电荷耦合器件摄像机及高分辨率的扫描仪或扫描平台；出图装置可以是图像显示终端、图像硬拷贝机等。

发展趋势　数字图像处理的发展主要来自计算机的发展、数学的发展和广泛的军事、工业和医学等方面的应用需求的增长。随着计算机和其他有关领域技术的迅速发展，例如在图像表现、科学计算可视化、多媒体计算技术等方面的发展，数字图像处理已从一个专门的研究领域变成了科学研究和人机界面中的一种普遍应用工具。

shuzi wanyongbiao

数字万用表

（digital multimeter）　应用模数转换技术，并以数字显示测量结果的多功能、多量限电表，简称 DMM 或数字多用表。可分为简易型（便携式）和精密型（台式）两类。

简易型数字万用表　可用于测量直流电压和电流、交流电压和电流，测量电路的电阻、电容、电感和电压的频率，测量晶体管的电流放大系数和检查二极管及线路的通断状态等。通用的 $3\frac{1}{2}$ 位或 $4\frac{1}{2}$ 位数字万用表是在数字电压表基础上扩充功能和量程实现的。其主要部件是一片集成 A/D 转换芯片，且具有自动调零、自动极性转换、过量程指示和过载保护等功能。

简易型数字万用表以干电池供电，采用高反差液晶显示器和旋转式或按键式多档开关。常用的 $3\frac{1}{2}$ 位数字万用表的特性为：①最大显示值：1999（即 3 位半数字）及自动极性指示。②显示方式：液晶显示。③测量方法：双斜积分 A/D 转换。④过量程指示：只在高位显示"1"。⑤最大共模电压：500V 直流或交流有效值。⑥读数显示率：每秒 2～3 次读数。其主要技术指标为：①直流电压、电流的测量误差为 ±0.5%读数±1 字；分辨率为 100μV 或 0.1μA。②交流电压的测量误差为±0.8%读数±3 字；分辨率为 100μV；频率范围为 40～400Hz；平均值转换。③电阻测量的误差为 ±0.5%读数±1 字；分辨率为 0.1Ω。④电容测量的误差为 ±2.5%读数±3 字；分辨率为 1pF。

简易型数字万用表已取代了模拟式万用表。

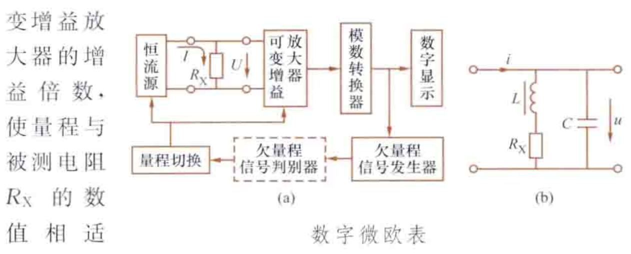
精密型数字万用表　内附有微处理器的多功能、多量程、自动化程度很高的智能测量仪器。它不仅能精确测量电压、电流、电阻、电容、电感等参量和参数，而且能对测量结果进行数据处理和分析。它将复合型 A/D 转换技术与微计算机技术紧密结合，有自诊断、自校准、自检验功能，能实现高准确度的测量，且便于与其他仪器组合成自动测试系统。$8\frac{1}{2}$ 位数字万用表的技术性能指标为：直流电压测量误差在 24h 内为 $\pm 0.5\times10^{-6}$ 读数 $\pm 0.1\times10^{-6}$ 满度；分辨率为 10nV。交流电压测量误差在 24h 内为 $\pm 30\times10^{-6}$ 读数 $\pm 10\times10^{-6}$ 满度；频率范围为 1～10^6 Hz；真有效值转换；波形因数为 5。具有如此高的技术性能指标，可取代传统的精密电位差计等计量仪器仪表，在计量部门得到广泛使用。

shuzi weioubiao

数字微欧表

（digital micro-ohm meter）　应用模数转换技术，测量微小直流电阻并以数字显示的电表。

图（a）是它的原理框图。让恒定电流 I 通过被测小电阻 R_X，其两端电压 U 即反映它的电阻值。图中，U 经放大、模数转换，以数字量显示测得的电阻值。为提高准确度并缩短测量时间，设有量程自动切换环节。如量程不合适，欠量程信号发生器发出信号给量程切换环节，改变恒流源电流大小和可变增益放大器的增益倍数，使量程与被测电阻 R_X 的数值相适应。如所



数字微欧表

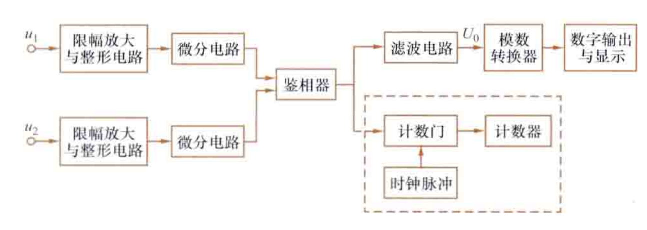
（a）原理框图；（b）带电感和电容的电阻的等值电路

测的是带有很大电感的小电阻，例如大容量电机、变压器绕组的直流电阻，那么，其电感 L 值可达百亨以上，且不可避免地还会伴随有匝间电容 C，数值常为微法数量级。这类绕组的等值电路如图（b）所示。对此，在切换量程时，u 值呈衰减振荡形式，致使量程切换环节工作不稳定，拖延测量时间，甚至不能正常工作。为此，可增设欠量程信号判别环节［见图（a）中虚线方框］，以使该电表能快速、准确判断所应选用的量程，以缩短测量时间。

shuzi xiangweibiao

数字相位表　（digital phase meter）　应用模数转换技术，测量相位并以数字显示的电表，又称数字相位计。其中，被测相位差须先经过转换，常用的转换方式有相位-时间转换和相位-频率转换两种。

相位-时间转换方式　如图所示，相位差为 φ_x 的两个同频率正弦信号 u_1 和 u_2 分别通过限幅放大和整形电路后形成方波，再经微分电路得到对应被测信号过零瞬间的尖脉冲。由这两组尖脉冲去触发鉴相器，使输出对应这两个过零瞬间相位差的方脉冲，即将 φ_x 转换成脉冲宽度（时间间隔）为 T_x、幅度为 U_g 的方脉冲，再利用滤波电路转换成直流电压 U_0，并通过模数转换器变成数字量后输出和显示。



数字相位表框图

周期为 T 的两个信号的相位差为 φ_x，过零点的时间差为 T_x，则有 $\varphi_x=(T_x/T)\times360°$。若滤波电路的时间常数足够大，在电路稳定后 $U_0=\frac{1}{T}\int_0^{T_x}U_g\mathrm{d}t=U_g\frac{T_x}{T}$，于是有 $\varphi_x=\varphi(U_0/U_g)\times360°$。可见，适当选择模数转换系数，使相位差为360°时对应输出的直流电压为3.60V，便可直接读出被测相角差的数值。

相位-频率转换方式　用计数法测量相位-时间转换中鉴相器输出的时间间隔 T_x。原理与数字频率表测量时间间隔基本相同，只是标准时钟经过分频后的输出为 360×10^n。设标准时钟信号的周期为 τ_C、周期为 T 的两个同频率信号的相位差 $\varphi_x=(N_x/N_T)\times360°$。可见 φ_x 不仅与计数 N_x 有关，而且还与被测信号的周期 T（对应于 N_T）有关。为使其与被测周期 T 无关，在计数门的输入条件中增加时基信号 T_S（采样时间）且 $T_S>T$，其倍数 $n=T_S/T$，则在每次采样时间 T_S 内的读数为 $N=nN_x=\frac{T_S}{\tau_C}\times\frac{\varphi_x}{360°}$，即计数器的读数 N 正比于 φ_x，而与周期 T 无关。

shuangjixing bandaoti qijian

双极型半导体器件　（bipolar semiconductor device）　半导体内两种极性的载流子（空穴和电子）都参加导电的电子器件。常用的NPN或PNP双极型晶体管（见半导体三极管）。在P型半导体内，空穴很多（称多子），电子很少（称少子）；在N型半导体内，电子很多（称多子），空穴很少（称少子）。双极型半导体器件既利用多子又利用少子参加导电，而少子的浓度易受温度、辐射等外界条件影响，所以双极型半导体器件的温度稳定性和抗辐射性较差。

图1所示为半导体器件，图2所示为带散热片的半导体器件。



图1　半导体器件

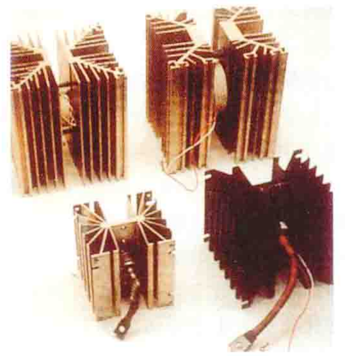


图2　带散热片的半导体器件

shuangjixing gonglü jingtiguan

双极型功率晶体管　（bipolar power transistor）　集电极具有一定耗散功率的双极型半导体器件。通常指集电极耗散功率在1W以上的晶体管，具有耐压高、工作电流大、自身耗散功率大等特点，广泛用于产生、控制、变换和放大有一定功率信号的电路。

分类　功率晶体管与一般晶体管一样，也分为锗和硅两种材料的制品，有NPN及PNP两种类型。当作为放大器使用时，器件工作在放大状态，常用于电源串联调压电路、音频和超声波放大等领域。但更多是作为大功率半导体开关，工作在截止和饱和状态，在电力电子技术领域应用广泛。根据用途和制造工艺的不同，功率晶体管可分为低频功率放大管、高频功率管和高反压开关管三大类。

低频功率放大管　这类功率放大管一般电流放大系数 β 值较高（30～500），饱和压降小（1～2V），集电极允许电流大（1～200A），耗散功率大（1～500W），伏安特性曲线较均匀，耐压在20～300V之间，通常用作低频功率放大器、稳压电源、低速开关和低电压电源的直流变换器等。

高频功率管　主要特性是高频情况下能输出大功率，并具有一定的功率增益。高频功率管的生产工艺难度较低频功率管大，一般集电极允许电流（0.5～50A）较低频管小，饱和压降较大（1～5V），β 值较低（10～20），伏安特性曲线均匀性较差。多数高频功率放大器中功率管都工作在丙类（功率放大电路的静止工作点偏置到截止点以下）状态，对特性曲线的均匀性没有严格要求。高频功率管多用于电台、雷达、电视差转机、通信、遥测等设备的功放、倍频和振荡等电路中。

高反压开关管　它的特点是耐压高［$U_{(BR)CBO}\approx400\sim2000$V］，集电极允许电流大（1～800A，甚至更大），饱和压降小［$U_{CE(sat)}\approx1\sim2$V］，但 β 值不高（5～20），伏安特性曲线均匀性较差时，开关速度不太高。典型代表是电力晶体管GTR（giant transistor）。从20世纪70年代末开始，GTR曾被广泛应

用于 300kW 以下的电力电子装置中，如直流稳压电源、直流电机控制、不停电电源、交流异步电机的变频调速、感应加热、超声波发生器、音频放大器等领域。20 世纪 90 年代曾普遍应用于高压大电流的达林顿晶体管模块，达到 1800V/1000A，频率为 2kHz。由于电力晶体管的开关电流和功率损耗大，会有基区大注入效应、基区扩散效应和发射极电流集边效应。为了削弱上述三种效应的影响，在结构上采取多个小晶体管管芯并联，以扩大集电极电流及功率。但仍存在着固有的二次击穿、多参数影响的安全工作区、较小的热容量、较低的过流能力等问题。GTR 在开关电源等小容量应用中已经被绝缘栅场效应功率晶体管代替，在较大容量应用中也已经被绝缘栅双极型晶体管代替。

使用要求 使用功率晶体管时应特别注意：①工作的峰值电流不能超过晶体管的集电极最大允许电流，否则 PN 结局部区域电流密度过大会损坏晶体管；②集电极瞬时电压不能超过 $U_{(BR)CEO}$（参见半导体三极管），否则会导致击穿；③应认真校核晶体管的耗散功率，并仔细计算管内热阻和散热器热阻，保证在最坏条件下管内的 PN 结结温不超过厂家规定值。

shuncixing

顺磁性

(paramagnetism) 物质受外磁场作用时呈现微弱的磁性，且其磁化强度 M 方向与磁场强度 H 方向相同的性质，也称常磁性。通常把具有顺磁性的物质称为顺磁质。由磁化率的定义 $M=\chi_m H$ 知，顺磁质的磁化率为正的，数量级在室温时一般为 $10^{-4}\sim10^{-5}$。

顺磁质分子的磁矩不为零，无外加磁场时，由于分子热运动，各分子磁矩取向无规则，因此宏观上对外不呈现磁性。在外磁场作用下，顺磁质中的每个分子都受到一个使分子磁矩沿外磁场方向排列起来的力矩的作用，使得分子磁矩有沿外磁场方向排列的趋势，因此在外磁场中顺磁质的磁化强度 M 方向与磁场强度 H 方向相同。对顺磁质来说，抗磁性效应也是存在的，只是它们的顺磁性效应比抗磁性效应强，以致抗磁性效应被掩盖。

顺磁质的磁化率与温度有关。对分子间相互作用可忽略的气体常磁质，在温度不很低、磁场不很强的情况下，磁化率χ_m与温度 T 成反比，即

$$\chi_m=C/T \tag{1}$$

这称为居里定律，式中 C 称为居里常数。

对分子间相互作用不可忽略的液体、固体顺磁质，遵从居里-外斯定律，即

$$\chi_m=C/(T-\theta) \tag{2}$$

式中 C 为居里常数；θ 为具有温度量纲的常数，称为外斯常数。不同顺磁质，分子间相互作用不同，一般说来外斯常数也不相同，它可正可负。居里-外斯定律适用范围为$T>|\theta|$。

从原子结构看，顺磁性是与原子、离子或分子具有未被电子填满的内壳层有关。常见的顺磁性气体有 O_2 和 NO 等，固态顺磁质有过渡族金属的盐类、稀土金属的盐类及氧化物等。温度高于转变温度时，铁磁质可转变为顺磁质。

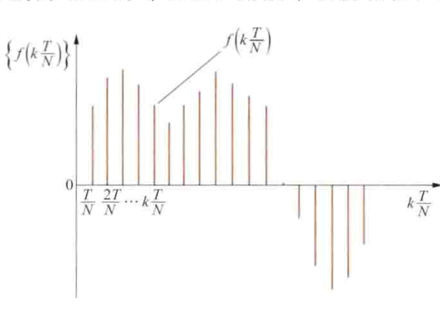
shunshizhi

瞬时值

(instantaneous value) 物理量在任一瞬时的值。在许多简单的情况下，物理量随时间变化的瞬时值，常用某一函数来描述。例如正弦电压的瞬时值 $u(t)$ 用余弦函数表示，即

$$u(t)=\sqrt{2}U\cos(\omega t+\varphi)$$

式中 U、ω 和 φ 分别为电压的有效值、角频率和初相位；t 是时间变量。对每个瞬时 t，可以从该式计算出对应的电压瞬时值 $u(t)$。非正弦周期电压和电流等时间函数，通常用傅里叶级数的形式表示。有时也用波形图来描述物理量随时间的变化。



离散时间信号

数字录波只记录若干离散时间点的瞬时值。常用的方法是将连续时间信号 $f(t)$ 的一个周期 T 分成 N 个等分点，每隔 T/N 秒进行一次采样得到离散时间信号 $f\left(k\frac{T}{N}\right)$，$k=1,2,\cdots,N$。图示用数字录波测得的离散时间信号，只在整数 k 下才可能有记录到的数据。

sixiangxian moni chengfaqi

四象限模拟乘法器

(four-quadrant analog multiplier) 两个输入信号均为双极性的模拟乘法器。它是信号检测和控制电路中应用较多的一个单元。

四象限模拟乘法器的电路如图（a）所示。忽略基极电流后，其对应的压控分流图如图（b）所示。由图（b）可得

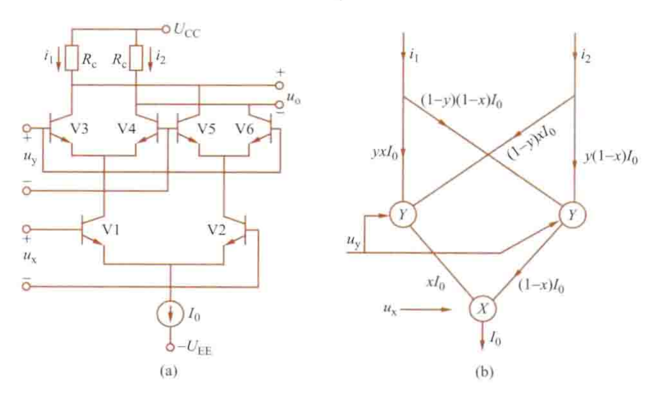
$$\begin{aligned} i_1-i_2 &= yxI_0+(1-y)(1-x)I_0-(1-y)xI_0 \\ &\quad -y(1-x)I_0 \\ &= (2x-1)(2y-1)I_0 \end{aligned}$$

式中 x 为对管 V1 与 V2 的电流分配系数；y 为对管 V3 与 V4、V5 与 V6 的电流分配系数。代入下式

$$\begin{aligned} u_o &= -R_c(i_1-i_2) \\ &= -R_c I_0 \,\mathrm{th}\frac{u_x}{2U_T}\,\mathrm{th}\frac{u_y}{2U_T} \end{aligned} \tag{1}$$

当 $u_x \ll 2U_T$，$u_y \ll 2U_T$ 时，式（1）近似得

$$u_o \approx -R_c I_0\frac{u_x u_y}{4U_T^2}=-Ku_x u_y \tag{2}$$



四象限模拟乘法器

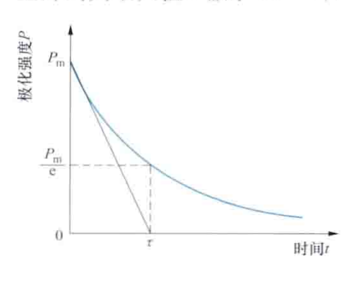
(a) 电路图；(b) 压控分流图

式（2）中，增益系数 $K=\frac{R_c I_0}{4U_T^2}$。从而可得结论：① u_x、u_y 均为双极性，故图（a）为四象限乘法器；② $K=\frac{R_c I_0}{4U_T^2}$，式中含 U_T^2 将产生较大的温漂；③两输入电压 u_x、u_y 的线性动态范围太小。

高性能的单片集成模拟乘法器大多增加了温度补偿以及扩展线性范围的措施，广泛用于模拟电压的调制、解调、平方、开方、鉴相等电路中。

songchi xianxiang

松弛现象（relaxation phenomenon） 电介质极化过程中表现出的极化强度与时间有关的现象，亦称弛豫现象。电介质中电子与离子位移极化仅需时间约为 $10^{-15}\sim10^{-12}$ s，故可忽略不计，而偶极子转向极化等则需要较长时间才能完成，在这类缓慢极化过程中极化强度与时间有关。当施加直流电场到电介质上时，极化过程中，极化强度 P 上升到其最大值 P_m 的（$1-1/e$）倍所需的时间定义为松弛时间，亦称弛豫时间，它亦等于直流电场移去以后极化强度 P 降落到 $\frac{P_m}{e}$ 的时间，如图所示。已知各类极化的松弛时间及出现该种极化的相应频段如表所示。



松弛时间示意图

由电介质极化松弛过程而表现出的宏观松弛现象有两种：①电介质电容充电或放电随时间衰减的吸收电流现象。②介电色散与吸收现象。

各类极化的松弛时间及响应频段

极化类型	电子极化	离子极化	偶极子极化等松弛极化
松弛时间(s) 响应频段	$<10^{-13}$ 可见光频	$10^{-10}\sim10^{-13}$ 红外光频	$10^{-2}\sim10^{-9}$ 电工与电磁波频率

suanfa

算法（algorithm） 解一确定类问题的、精确描述的方法。它由有穷个可完全机械执行的、有确定结果的指令（或命令、语句）构成。

任一算法均具有以下五个特征：输入、确定性、有穷性、输出和能行性。①输入：一个算法有零个或多个输入量，这些输入量是算法所要求的初始信息，它们由有限字母表的字符串构成；②确定性：算法的每一步都必须有确切的意义，动作不能有二义性；③有穷性：一个算法对任一合法输入必须在执行有穷步后终止；④输出：一个算法有一个或多个输出信息，它们常是与输入信息有特定联系的量；⑤能行性：所有的动作必须是能行的。由于能行性要求，算法必须有离散性（有限字母表）和机械性（有限能行的动作）。对于一确定类问题，给出了输入量后，得到该问题类的一个实例，机械地执行（由人、计算机或其他运算工具）相应的算法，就可以获得实例的解答。能够用算法来解的问题或函数称为可计算问题或可计算函数。

发展简史 在古代，计算通常是指数值计算。算法也仅限于在算术运算的范围内。中国古代的筹算和珠算口诀及其执行规则已有了算法的雏形，它们所解决的问题类是加、减、乘、除等四则运算。古希腊数学家欧几里得（Euclid）在其《几何原本》中，提出了著名的欧几里得算法，即求两个正整数的最大公约数的辗转相除法，它已具有算法的基本特征。在20世纪以前，人们直观地认为，所有的问题类都是算法可解的。直到20世纪30年代，英国数学家A. M. 图灵（A. M. Turing）提出了图灵机数学模型，论证了图灵机与其他计算模型的等价性，才使能行性计算（动作）的概念建立在形式化的基础上。通常称图灵机确定的函数类为图灵可计算函数类。进而，A. 丘吉（A. Church）提出了一个论题：直观地非形式定义的能行可计算函数类与图灵可计算函数类同一。在此基础上，人们证明了算法不可解问题类的存在。包括①停机问题：给定任一算法和任一输入，它能在有穷步内停机吗？②希尔伯特（Hirbert）第十问题：给定一个 k 个变量的整系数多项式方程，它有整数解吗？它们就是算法不可判定的两个著名例子。

非确定型多项式类（NP）完全问题是算法领域中尚未解决的一个难题。

分类 现代算法的概念与计算机科学紧密地联系在一起，计算也远远地突破了数值计算的范围，扩展到大量的非数值计算、判定和枚举问题。根据不同的处理方法和计算机模型，算法可分为串行算法、并行算法、概率算法、近似算法等。也可根据讨论的对象来分，分为查找法、散列算法、分类算法等。

不能对一切输入量都在有穷步内终止的运算称为计算过程，也称部分算法，相应地本条所指的算法也称为完全算法。具有确定性的算法称为一意算法，如果在各步中，可以执行若干条（有限条）动作之一，从而输出不唯一，则称之为多意算法。

算法设计 研究设计算法的一般规律和方法，对现实生活中的问题，设计出求解的算法。常用的算法设计方法有分治法、贪心法、动态规划法、回溯法、分枝限界法、局部搜索法、归约法等。

算法复杂度 衡量算法优劣的一种测度。可分为时间复杂度和空间复杂度，分别表示对于输入规模为 n 的问题计算模型所使用的时间与空间，它们都是 n 的函数。计算模型可以是图灵机或其他模型，也可以是某种计算机程序设计语言。

算法分析 分析算法的复杂度，或者研究某一问题类复杂度的下界。通常认为，具有指数复杂度的算法在现实计算机中是难以使用的，相对而言，具有多项式复杂度的算法则是难度较低的。有一类称为NP完全问题的算法类，是20世纪70年代以来算法研究的重大课题之一，这类问题已经找到指数复杂度的算法，但迄今为止既不能证实也不能否定它们存在着多项式复杂度的算法。

suiji cunqu cunchuqi

随机存取存储器（random access memory，RAM）

见半导体存储器。

suiji kongzhi lilun

随机控制理论 (stochastic control theory)

研究随机系统的动态特性以及随机系统的分析和控制的理论，也称随机系统理论或随机系统控制理论。一切随时间变化的过程，往往受到某些不确定因素的作用。这些不确定因素通常又服从某种统计规律，这种具有统计规律性的不确定因素称为“随机因素”。在工业生产过程中，用以表征该过程运行状况的变量（温度、压力等），除了受到一些人为调节的控制量（燃料流量、排气阀开度等）的影响外，还受到某些随机因素（环境温度、外界气流等）的影响。随机因素有：随机输入信号、随机扰动和随机的系统特性等。这些随机因素起作用的系统称为随机系统。随机系统的数学模型一般是含随机过程的差分方程或微分方程。与随机系统相区别，如果系统的结构和参数是确定的、已知的，作用于系统的输入信号（包括扰动）也是确定的，可以用数学表达式或图表确切表示的，则这种系统就是确定性系统。由于随机因素总是或多或少地存在的，严格地讲，真正的确定性过程或系统是没有的，只是由于随机因素影响小，可以略去不计，才能将很多系统视作确定性系统。

随机控制理论主要内容包括数学模型的建立、系统分析、系统估计、卡尔曼滤波、随机最优控制、系统辨识和参数估计、适应控制等。

数学模型的建立　模型与实际过程在统计意义下有等价的输入输出关系。模型要满足因果性假设等逻辑关系。与确定性系统类似，随机系统模型也分时域描述和频域描述、输入输出描述和状态空间描述。

系统分析　在很多方面可利用确定性系统分析的已有结果，包括冲激响应函数、传递函数、可控性、可观测性、稳定性等。

系统估计　由于随机系统固有的不确定性，系统的状态和输出都表现为具有某种统计特性的随机过程。因此，在一般情况下，企图确定地测量系统在某个时刻的状态，或确定地预报系统状态和输出在未来时刻的变化，都是不可能的。随机控制理论运用数理统计中的估计理论来研究对系统状态或输出的估计。（见估计理论）

卡尔曼滤波　从夹杂着噪声的信号中将所需要的信号分离出来的一种状态估计方法。（见卡尔曼滤波）

随机最优控制　针对某个随机系统选择控制变量，使得某个性能指标达到最优。（见随机最优控制）

系统辨识和参数估计　根据输入和观测估计实际系统的数学模型，是系统辨识问题；根据输入和观测估计实际系统的参数，是参数估计问题。（见动态系统辨识）

适应控制　随时辨识系统的数学模型，随时按此模型来调整最优控制律。（见适应控制系统）

suiji zuiyou kongzhi

随机最优控制 (stochastic optimal control)

选择控制变量，使随机系统某个性能指标达到最优的控制。在随机系统控制中，必须进行状态估计。应用不同的状态估计方法，会得到不同的解。因为系统的状态方程和观测方程一般都要受到噪声的干扰，系统的状态是不确定的，确切知道的只是已经获得的一组输出数据和已经施加于系统的控制输入。如何利用这些输入输出数据实时信息去估计系统的状态或输出，便构成了不同的信息结构。因此，随机最优控制问题的研究首先必须与信息结构相联系。信息结构分为经典信息结构和非经典信息结构。对于经典信息结构，每一时刻控制量的确定都利用了最大实时信息。而在非经典信息结构下控制量每个分量的确定利用了最大实时信息的一部分。

其次，随机最优控制问题还必须规定控制策略，即如何利用信息去处理被优化的性能指标，从而导致不同类型的控制函数。

开环控制策略是把优化性能指标中所有的随机量用其先验均值代替，从而简化为一个确定性的最优控制问题。这样得到的最优控制是一个开环控制函数

$$\bar{\boldsymbol{u}}^*(t)=\boldsymbol{g}[t,\bar{\boldsymbol{x}}(t_0)],t\geqslant t_0$$

式中 $\bar{x}(t_0)$ 是初始状态的均值。

闭环控制策略是在动态规划的每一步都要利用实时信息，控制是信息 $z(t)$ 的函数

$$\boldsymbol{u}^*(t)=\boldsymbol{\varphi}[t,\boldsymbol{z}(t)],t\geqslant t_0$$

在随机的情况下，由开环控制策略得到的开环控制函数与由闭环控制策略得到的闭环控制函数，一般是不等价的。通常只有经典信息结构下的闭环最优控制，才是本来意义的最优控制。亦即，利用最大实时信息，并采用闭环控制策略，才能使被优化的性能指标在统计意义下达到最优。

对于线性二次型高斯（LQG）问题，可以由分离原理（也称分离定理）给出其解析解。最优策略可以由两部分组成：一部分是最优滤波器，它按卡尔曼滤波公式求得 t 时刻的状态估计 $\hat{x}(t\mid t)$。另一部分是按确定型系统优化求得最优线性反馈，用状态估计 $\hat{\boldsymbol{x}}(t\mid t)$ 代替确定型反馈解中的状态 $\boldsymbol{x}(t)$，得闭环最优解。

suidao erjiguan

隧道二极管 (tunnel diode)

隧道效应的半导体二极管。若在一个二极管 PN 结的 P 区和 N 区都大量掺入杂质，则当二极管加上正偏压时，其伏安特性曲线的一部分将出现负阻特性。因为大量掺杂质会产生一个非常薄的势垒区，某些电子可以在小的正偏压下通过隧道穿过这一势垒，从 N 区进入 P 区，这种物理现象称为隧道效应，因此这种二极管取名为隧道二极管。但是，仅当 N 区中满带的电子可以通过隧道进入 P 区的空带时，才能产生隧道效应，为此，能带结构必须如图 1 所示。图中 W_{FN} 和 W_{FP} 表示费米能级的能量值。这样就能解释图 2 中的负阻特性，即电流随电压的增加而减小的那段特性。

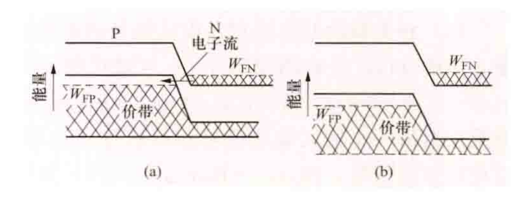


图 1　隧道二极管的能带图

(a) 小正偏压情况；(b) 大正偏压情况

当加上一个小的正向偏压时［图 1 (a)］，N 区中的满带与 P 区中的价带的空带相对应出现，因此，在一个小的正向偏压下电子可以从隧道穿过使电流增加。随着偏压的增加，隧道电流减小，形成图 2 中的负阻特性。当隧道电

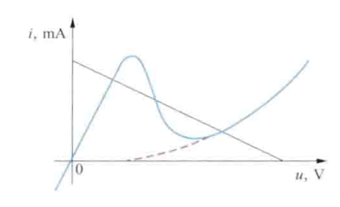


图 2 隧道二极管的伏安特性

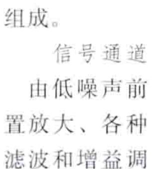
流降到零时，曲线再次上升，随后就像一般的加有正偏压的面接触型二极管的特性一样。

隧道二极管因其具有负阻特性可用于纳秒级的高速开关电路或高频振荡电路，其振荡频率可达几千兆赫。

suoding fangdaqi

锁定放大器 (lock-in amplifier) 一种能把待测信号中与参考信号同步的信号放大并检测出来的微弱信号检测仪器。它的输出并不是放大了（不失真）的待测信号，而是与待测信号幅度和相位相关的直流电压，也称锁相放大器。性能优异的锁定放大器能把幅值小到0.1nV，且信噪比小于10^{-3}的周期信号检测出来，并放大到10V以上。

典型电路结构 锁定放大器的类型很多，典型电路结构如图1所示。它由信号通道、参考通道和相关器三部分组成。



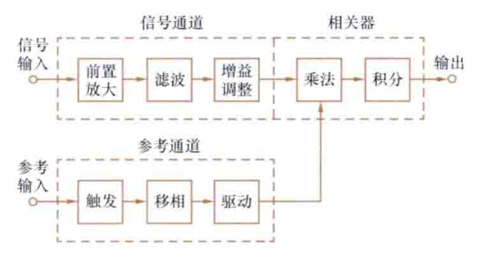


图 1 典型锁定放大器的电路结构图

信号通道 由低噪声前置放大、各种滤波和增益调整电路组成。其作用是将弱信号放大到足以推动相关器工作的电平，并有抑制和滤除部分噪声及干扰的功能，也要能调整增益扩大仪器的动态范围。为适应不同测量对象的需求，前置放大器最佳信号源电阻必须能够与不同传感器进行噪声匹配以得到最佳噪声特性。如果被测信号是直流信号，则可用斩波器先将它转换为交流信号后，再进行检测。

参考通道 由触发、移相和驱动电路组成。送入参考通道的是与待测信号同频率的周期信号，该信号经触发电路后，再由相角范围可控制的移相电路进行相位设定，然后经驱动电路送入相关器。

相关器 锁定放大器的关键部件，由乘法器和积分器组成，完成被测信号与参考信号相关函数运算。它必须具有动态范围大、漂移小、时间常数可调、增益稳定和频率范围宽等特点，并要求输入信号为正弦波或方波。

（1）相关器的基本原理。设从信号通道传到乘法器一个输入端的 $x(t)$ 是有用信号 $s(t)$ 与随机噪声 $n(t)$ 之和，即 $x(t)=s(t)+n(t)=A\sin(\omega_0 t+\varphi)+n(t)$；从参考通道传到乘法器另一个输入端的信号 $y(t)$ 是与 $s(t)$ 同频、且有一定相位差的信号，即 $y(t)=B\sin\omega_0(t+\tau)$，其中 τ 是时间位移，两者的互相关函数为

$$\begin{aligned}R_{xy}(\tau)&=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T B\sin\omega_0(t+\tau)[A\sin(\omega_0 t+\varphi)+n(t)]\mathrm{d}t\\&=\frac{AB}{2}\cos(\omega_0\tau-\varphi)+R_{ny}(\tau)\end{aligned}\tag{1}$$

由于参考信号 $y(t)$ 与噪声 $n(t)$ 互不相关，所以 $R_{ny}(\tau)=0$。因此式（1）可表示为

$$R_{xy}(\tau)=\frac{AB}{2}\cos(\omega_0\tau-\varphi)\tag{2}$$

式（2）中，若 $\omega_0\tau-\varphi=0$，即 $s(t)$ 与 $y(t)$ 同相，则 $R_{xy}(\tau)=AB/2$ 取值最大；若 $\omega_0\tau-\varphi=90°$，则 $R_{xy}(\tau)=0$。这说明，$R_{xy}(\tau)$ 正比于有用信号 $s(t)$ 的幅值，并与 $s(t)$ 和 $y(t)$ 的相位差有关。因此，相关器也称为相敏检波器（phase sensitive detector，PSD）。

由以上分析可见，对于频率相同的正弦信号 $s(t)$ 和 $y(t)$，如果已知其中一个的幅度，就可以由互相关函数测定另一个信号的幅度，而且利用互相关法处理和抑制噪声，可以避免直接测量信号幅度时噪声带来的误差。

实际应用中，考虑到线性与动态范围，通常相关器中不采用模拟乘法器，而采用线性好、动态范围大、电路简单的电子开关式乘法器，也称为电子开关式相敏检波器。

（2）电子开关式相敏检波器。相当于参考信号 $y(t)$ 是幅度为±1的方波时的模拟乘法器式的相敏检波器。图2是利用运放实现的电子开关式相敏检波器的原理框图。根据 $y(t)$ 移相后的高低电平控制电子开关的接通位置，当 $y(t)$ 为+1时电子开关接通 $Ax(t)$；当 $y(t)$ 为−1时，电子开关接通 $-Ax(t)$。这样就实现了 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的相乘功能。

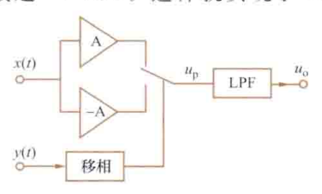


图 2 运放式电子开关相敏检波器

假定，输入信号 $x(t)$ 是与参考信号 $y(t)$ 同频率的正弦信号，可以证明相敏检波器的输出 $u_o(t)$ 正比于 $U_s\cos\theta$，其中 θ 是两个信号的相位差，U_s 是正弦信号的幅值。图3显示了不同移相情况下相敏检波器的波形。当 $\theta=0°$ 时，$\cos\theta=1$，相敏检波器相当于全波整流，经低通滤波器后 $u_p(t)$ 的平均值 $u_o(t)$ 最大；当 $\theta=90°$ 时，$\cos\theta=0$，经低通滤波器后 $u_p(t)$ 的平均值 $u_o(t)$ 等于0；当 $\theta=180°$ 时，$\cos\theta=-1$，相敏检波器相当于反向全波整流，经低通滤波器后 $u_p(t)$ 的平均值 $u_o(t)$ 负向最大。

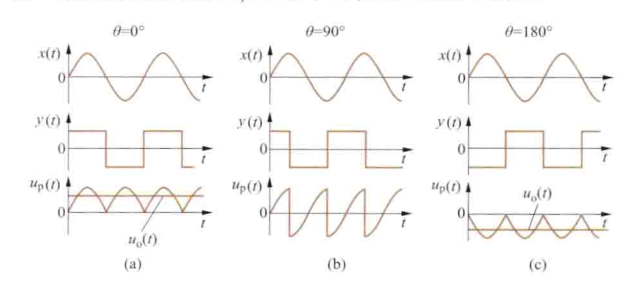


图 3 不同相位时相敏检波器的波形
（a）$\theta=0°$；（b）$\theta=90°$；（c）$\theta=180°$

主要技术指标 除了常规检测仪器的灵敏度、线性度、分辨率等指标外，还有常用的抵御噪声能力的技术指标，包括过载电平、最小可测信号、满刻度输出时的输入电平、动态范围。①过载电平（overload level，OVL）：使系统出现过载时输入端的电平，即测量上限，为允许噪声峰值。②最小可测信号（minimum discernible signal，MDS）：输出能辨别的最小输入信号，是测量下限。取决于系统漂移（温漂、时漂）。③满刻度输出时的输入电平（full scale input level，FS）：表征灵敏度，取决于增益，为允许信号峰值。④动态

范围：图 4 是锁定放大器的动态范围示意图，它描述了 OVL、FS 与 MDS 三者之间的关系。图中，输入总动态范围（dB）＝输出动态范围（dB）＋动态储备（dB）。其中，输入总动态范围＝20lg（OVL／MDS）（dB），反映允许的输入噪声最大峰值与最小信号之间的关系；输出动态范围＝20lg(FS／MDS)(dB)，反映可以检测出的有用信号的动态范围；动态储备＝20lg(OVL/FS)(dB)，反映系统抵御干扰和噪声的能力。

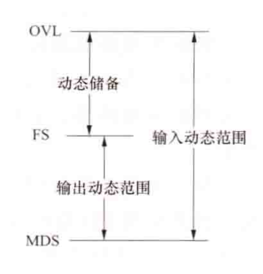


图 4　锁定放大器的动态范围

发展及类型　自 20 世纪 50 年代开始研制锁定放大器以来，锁定放大器的原理没有新的突破，但其性能在不断提升。随着微电子技术的发展，先后出现了模拟锁定放大器、数模混合锁定放大器和数字锁定放大器。

模拟锁定放大器　由模拟电路实现的产品。根据在相敏检波器前采用的抑制噪声技术的不同，形成了性能各异的产品，例如采用窄带通滤波、调谐放大、外差式、旋转电容滤波、同步积分器等技术。如果在单个相敏检波器的基础上再增加一个正交相敏检波器就形成了正交矢量型锁定放大器。这两个相敏检波器的输入信号是相同的，只是参考信号在相位上差 90°。它可分别检测出被测信号的幅值和相位，避免了测量时对参考信号作可变的移相调节以及移相的调节误差对测量准确性的影响。由于模拟器件的温漂和噪声影响，限制了输出信噪比的提高以及动态范围；另外，锁定放大器没有反馈调节，信号失真程度较大；而且模拟电路系统一旦设计完毕，其功能完全被确定，系统升级能力差，成本也高，这些因素限制了它的发展。但是，模拟锁定放大器在一些特殊场合有数字锁定放大器不可替代的特性，例如对信号的相位比较敏感的系统和高频系统中应用等。

数模混合锁定放大器　在信号输入通道、参考信号通道和输出通道采用数字滤波器抑制噪声，或者在模拟锁定放大器的基础上增加模数转换器、数模转换器和各种通用数字接口功能，可以实现由计算机控制、监视和显示等辅助功能，但其核心部件相敏检波器仍是采用模拟电路实现的，本质上也是模拟锁相放大器。

数字锁定放大器　主要由信号输入通道、参考信号通道、数字相敏检波器、数字低通滤波器、输出通道、数字信号处理器等电路组成。信号输入通道中的交流放大器和抗混叠滤波器仍然需要使用模拟电路，为系统中的 A/D 转换器提供满足要求的信号幅值和满足采样定律的频率范围。被转换后的数字信号被送入数字信号处理器中，依据一定的算法完成相敏检波器的功能，再通过数字低通滤波器后获取差频后的直流信号。参考信号通道以信号通道相同的采样速率为数字相敏检波器提供所需要的相位信息。参考信号有内部参考信号与外部参考信号两种来源。在外部参考信号模式下，从外部输入的模拟参考信号或逻辑电平，采用数字相位锁相环算法测量其频率并产生所需要的相位信号。在内部参考信号的模式下，只需要给参考信号处理模块输入所需要的参考信号频率值，就可以在所选定的频率上产生数字相敏检波器需要的相位信号，这种方式不需要外部参考信号模式和模拟锁定放大器所需要的移相电路，降低了相位噪声。参考信号处理单元也可实现数字参考相移。输出通道中的数字低通滤波器，可以减小模拟滤波器截止频率不稳定造成的误差。输出 D/A 转换器将数字信号转换为模拟信号输出。

数字信号处理硬件技术和软件算法的发展，使数字锁定放大器对超低频的信号检测能力超过模拟锁定放大器，并能设计出数字锁定放大器独有的新功能。在不变的硬件平台上，也能通过软件算法的升级而使整个系统的性能得到提高。这种数字化硬件平台容易模块化，可以嵌入到其他系统中，使数字锁定放大器的应用更加广泛。数字锁定放大器与计算机相结合，可以使数字锁定放大器成为虚拟仪器；也可被软件化为软件锁定放大器。当然，要使这些研究转变成商品应用还需假以时日。

应用　锁定放大器在物理、化学、力学、生物医学、光电信号检测、电子测量等领域有着极为广泛的应用。例如，分子质谱仪、扫描电镜、软 X 射线激发电位能谱仪、俄歇电子谱仪等仪器中都采用了锁定放大器。

参考书目

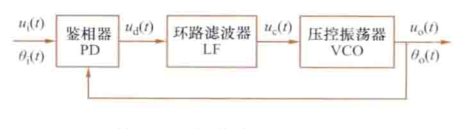
高晋占．微弱信号检测．北京：清华大学出版社，2004.

suoxianghuanlu

锁相环路

（phase locked loop，PLL）　一种相位误差控制电路，能实现环路输出信号与输入信号之间无误差的频率跟踪。广泛应用在通信、广播电视、遥测遥控、频率合成、测量系统等方面。

电路组成　锁相环路的基本组成框图如图所示，它由鉴相器（phase detector，PD）、环路滤波器（loop filter，LF）和压控振荡器（voltage-controlled oscillator，VCO）构成闭环控制回路。PD 是相位比较器，用来检测环路输入信号 $u_i(t)$ 与输出信号 $u_o(t)$ 之间的相位差，即 $\theta_i(t)$ 与 $\theta_o(t)$ 的差值，输出与相位差成比例的误差电压 $u_d(t)$。LF 通常是低通滤波器，其主要作用是滤除鉴相器输出的高频分量，提高环路稳定性。VCO 是电压/频率转换器，改变控制电压 $u_c(t)$ 能调整 VCO 的瞬时振荡角频率。



锁相环路基本组成框图

工作原理　假定某种原因使 VCO 的振荡角频率偏离输入信号的角频率，VCO 振荡信号的相位必然产生相应变化。此相位变化在鉴相器中与环路输入信号的相位比较，使鉴相器输出一个与相位差成比例的误差电压 $u_d(t)$，经过低通滤波器取出其中缓慢变化的分量 $u_c(t)$ 控制 VCO，将使振荡角频率稳定地等于输入信号的角频率。此时，锁相环路处于“锁定状态”，鉴相器两个输入信号的角频差为零，即 $\omega_i-\omega_o=\Delta\omega(t)=0$。

任意周期信号的瞬时角频率与瞬时相位之间的关系为

$$\omega(t)=\mathrm{d}\theta(t)/\mathrm{d}t \tag{1}$$

或

$$\theta(t)=\int\omega(t)\mathrm{d}t+\theta_0 \tag{2}$$

式中 θ_0 为初始相位。对照式（2）可列出锁相环路处于“锁定状态”时，鉴相器两个输入信号的瞬时相位差为

$$\theta_e(t) = \int \Delta\omega(t)\mathrm{d}t + \theta_0 \qquad (3)$$

分两种情况来讨论：①若 $\omega_i = \omega_o$ 则 $\Delta\omega(t) = 0$，由式（3）可得到 $\theta_e(t) = \theta_0$，说明环路输入信号与 VCO 输出信号角频率相等时，它们的瞬时相位差是一个常数。②若 $\theta_e(t) = \theta_0$ 时，由式（1）可得到 $\Delta\omega(t) = \mathrm{d}\theta(t)/\mathrm{d}t = 0$，即 $\omega_i = \omega_o$，说明环路输入信号与 VCO 输出信号的瞬时相位差是一个常数时，它们角频率必然相等。

由此可得到锁相环路的重要概念：当加到环路鉴相器的两个信号频率相等时，它们之间的相位差保持不变；反之，若两个信号的相位差保持恒定时，它们的频率必然相等。

当锁相环路锁定之后，两个信号 $u_i(t)$ 与 $u_o(t)$ 的频率相等，但两者之间存在恒定的相位差，这就是稳态相位差。此稳态相位差经鉴相器变换为直流信号，通过低通滤波器控制 VCO 使 ω_i 与 ω_o 同步。

如果由于某种原因使 VCO 的角频率 ω_o 发生变化，由式（2）可知，两个信号之间的相位差不再是恒定值，鉴相器的输出电压也跟着发生变化，从而使 VCO 的角频率不断改变，直至 $\omega_i = \omega_o$ 为止。

基本特性 锁相环路在正常工作状态（锁定）时，基本特性有：①自动跟踪特性。当输入信号频率稍有变化，压控振荡器的频率立即发生相应的变化，并最终使输出与输入信号同频率。②良好的滤波特性。锁相环路通过环路滤波器的作用，能够将输入信号中的噪声和干扰信号滤除。设计良好的锁相环路，其滤波通带可以做到很窄，环路相当于一个滤除噪声的窄带滤波器。③理想的频率控制特性。锁相环路在锁定状态只有剩余相差，没有剩余频差。利用锁相环路，能够实现频率的自动控制，获得多频率、高稳定的振荡信号输出。

集成锁相环路及应用 集成锁相环路的发展很快，已经形成各种性能、不同用途的系列产品。按其内部电路结构可分为模拟锁相环路、数模混合锁相环路及数字锁相环路三种类型。

模拟锁相环路　PD、LF、VCO 等部件全由模拟电路实现。最常见的 PD 是模拟乘法器，LF 采用 RC 无源或有源低通滤波器，VCO 有变容二极管压控振荡器、射极耦合多谐压控振荡器等。由于 VCO 的控制电压是模拟量，其振荡频率是连续可变的。通信系统中的锁相接收机、载波提取、调角信号的产生与解调等常采用模拟锁相环路。

数模混合锁相环路　采用数字鉴相器（PD），LF、VCO 与模拟锁相环路相同。环路中的 $u_d(t)$、$u_c(t)$ 仍为模拟信号，PD 的输入信号是数字信号。电荷泵锁相环是典型的数模混合锁相环路。常在频率合成中使用，也可用于提取相干载波及位同步信号。

数字锁相环路　全部部件都是数字电路，所有信号都是数字信号。它由数字鉴相器（DPD）、数字环路滤波器（DLF）和数控振荡器（DCO）组成。DPD 用来检测相位误差并作量化处理，DLF 对 DPD 输出的数字信号进行数字滤波，DCO 实际上是分频器，它的分频比受 DLF 输出信号的控制。DCO 的输出频率是不能连续可调的。其中，DLF 可用硬件实现，也可用软件实现，整个锁相环可以用可编程逻辑器件或单片机实现。数字锁相环路常用来提取位同步信号。

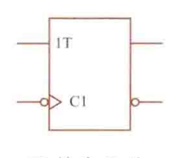
参考书目

王福昌，鲁昆生．锁相技术．2 版．武汉：华中科技大学出版社，2009.



T chufaqi

T触发器 （T flip-flop） 在时钟脉冲的有效作用下，它的新输出状态取决于原来状态和输入端T状态的触发器。T触发器的图形符号如图所示，图中T为信号输入端，C1为时钟信号输入端，输出为两个互补信号，稳态时的逻辑状态相反，一般用 Q 和 $\overline{Q}$ 表示。



T触发器的图形符号

T触发器的逻辑功能如表所示，其中 Q^n、Q^{n+1} 分别表示触发器的现态和次态。从表中可以看出：若 $T=1$，则时钟信号到达后触发器的次态与现态相反，即 $Q^{n+1}=\overline{Q^n}$；若 $T=0$，则时钟信号到达后触发器的状态不变。

T触发器的功能表

T	Q^{n+1}	T	Q^{n+1}
1	$\overline{Q^n}$	0	Q^n

集成触发器多数为JK触发器和D触发器，很少有制作成T触发器的。不过，只要经过简单的转接，即可把JK触发器或D触发器转换成T触发器。

TTL yufeimen

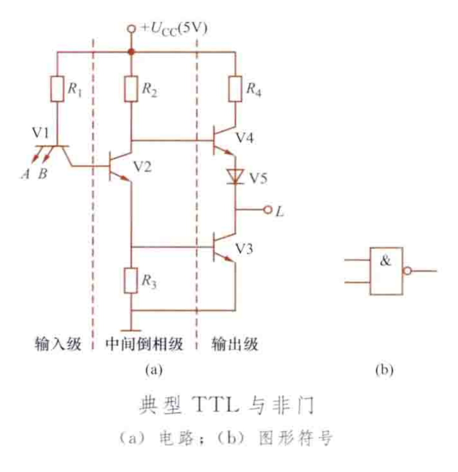
TTL与非门 （TTL NAND gate） 集成电路输入级和输出级全采用晶体管组成的能实现与非逻辑关系的集成逻辑门电路。TTL是用集成工艺做成的晶体管—晶体管逻辑电路（transistor-transistor logic，TTL）的简称。与非门的真值表（见逻辑函数）如表所示。典型的TTL与非门电路及其图形符号如图所示，电路可分为输入级、输出级和中间倒相级三部分。

与非门真值表

A	B	L	A	B	L
0	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	0

（1）输入级：由多发射极晶体管V1构成。它有两个作用：一是实现“与”功能；二是V2管由饱和变为截止的过程中，其基区存储电荷可通过V1管的 i_{c1} 加速消散，使电路的工作速度提高。

（2）输出级：在稳定状态下，V3和V4总是一个导通而另一个截止，有效地降低了静态功耗并提高了驱动负载的能力。通常将这种形式的电路称为推拉式（push-pull）或图腾柱（totem-pole）输出电路。为了确保V3饱和导通时V4可靠截止，增加了二极管V5。



典型TTL与非门

（a）电路；（b）图形符号

（3）中间倒相级：V2管的集电极与发射极输出互为倒相的电压，以满足输出级推拉式工作要求。中间级电路对门的负载能力及工作速度均有较大影响。

电路中，任一输入端（A 或 B）为低电平时，输出端即为高电平；当所有输入端全部为高电平时，输出端即为低电平（见与非门真值表），因此这个电路完成“与非”逻辑（即 $L=\overline{A\cdot B}$）。

tanhuagui

碳化硅 （silicon carbide） 一种非常稳定的共价键化合物，分子式为SiC。无天然产物。将焦炭与石英料混合加热至2100℃以上可制备粉粒状SiC，2200℃以上发生升华，用升华生长技术可制备SiC单晶，用籽晶-升华生长技术可制备大几何尺寸的高质量单晶，用化学气相沉积等薄膜技术可制备SiC外延薄膜。SiC结晶型态很多，已发现有200种晶型结构，其中主要有六角与菱形晶系（又称α-SiC）和立方晶系（又称β-SiC）。

SiC为宽禁带半导体（禁带宽度>2.5eV），具有高导热率［可达500W/(m·K)］、高硬度（仅次于金刚石）和高熔点等特性，在民用与国防电子、电工和机械方面具有越来越重要的应用价值。粉粒状SiC，用于机械研磨与切割；用粉粒SiC分别混合不同的添加成分、经干压成型和高温烧结可制成高温耐热陶瓷与电-热元件；在还原气氛中烧结的SiC陶瓷，具有晶界隧道效应，可制成电压敏元件，用于电路中的瞬态过电压抑制；N型SiC粉粒与有机漆混合可用于提高大型电机线棒端部电晕放电的起始电压。SiC材料具有优良的导热特性，是用作大功率电子器件与集成电路的理想导热绝缘复合材料，大尺寸SiC单晶及其元素掺杂技术的成功，已使SiC发展成为可在250℃高温下工作的功率电子和微电子器件的新型半导体材料。不同类型SiC的发光波段可覆盖整个可见光与紫外光范围，因而，也是制造各种发光器件的重要材料。

Tangsen fangdian lilun

汤森放电理论 （Townsend theory） 解释气体放电机制的最早理论。由英国物理学家J.S.汤森（J.S. Townsend）于1903年提出。这种理论认为：气体间隙中发生的碰撞电离以及阴极上发生的二次电子发射（见阴极电子发射）过程是气体间隙击穿的主要机制。该理论最早定量地解释了气体放电过程。

气体间隙中的碰撞电离和电子崩　用紫外线或放射源辐照一个低气压的间隙，会在阴极上产生自由电子。自由电子在电场的作用下从阴极飞向阳极，并在加速过程中获得能量。如果外电场足够强，则电子在它的飞行路径上与原子、分子相碰撞时，会发生碰撞电离，并产生新的自由电子，即发生电子的倍增；原有的和新生的电子在继续飞向阳极的过程中，又会发生新的碰撞电离，再发生电子倍增。如此继续下去，将出现电子“雪崩”似的增加，结果会形成一个头部为球形尾部为圆锥形的电子崩。图 1 是用云室获得的电子崩形象。

阳极

电子崩

阴极

图 1　电子崩

碰撞电离系数 α　为了定量地描述电子碰撞电离的作用，而引入一个系数 α，它表示电子从阴极飞向阳极的过程中，沿着电场方向在单位长度上所发生的碰撞电离次数。设 n_0 为阴极处的初始电子数，当它们飞过间隙距离 d 而达到阳极时，由于电子碰撞电离的作用，在阳极处的电子数 n 增加为

$$n = n_0 e^{\alpha d} \tag{1}$$

或写成电流 i 的形式为

$$i = i_0 e^{\alpha d} \tag{2}$$

式中 i_0 为初始电流。系数 α 与气体的种类、气压 p 及电场强度 E 有关。通常 α 表示为

$$\alpha = pAe^{-B(E/P)} \tag{3}$$

式中 A 和 B 是常数。

阴极上发生的过程和系数 γ　在间隙中由于电子碰撞电离，不仅产生新的电子还要产生正离子。正离子向阴极运动，当打到阴极时，会产生二次电子发射，使间隙中的电子进一步增加。这个过程称为 γ 过程。系数 γ 定义为一个正离子打到阴极时所释放的二次自由电子数。更准确地说，γ 过程是间隙中的正离子、光子和亚稳态原子撞击阴极时所引起的总的二次电子发射效应。系数 γ 的数值与气体及阴极材料的种类、E/p 值以及阴极的表面状态有关。图 2 是惰性气体离子（Ar^+、Ne^+、Kr^+、Xe^+）及不同阴极（Na、Cu、Fe）组合下的总的二次电子发射系数 γ。处于空气中的铝、铜、铁的 γ 数值大致分别为 0.035、0.025 和 0.02（在气压较低、E/p 值较大时所得的数值）。

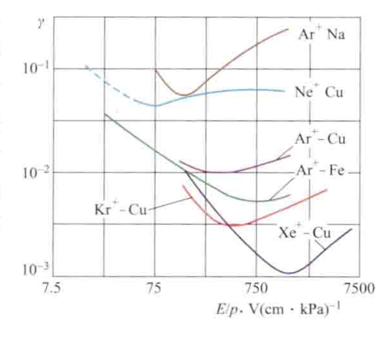


图 2　惰性气体中不同阴极材料的总的 γ 值

自持放电条件　考虑到电子碰撞电离和阴极上发生的 γ 过程，从阴极出发的 n_0 个电子达到阳极时，其数目增加为 n

$$n = n_0 \frac{e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)} \tag{4}$$

对应的电流为

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)} \tag{5}$$

产生自持放电的条件是式（5）的分母为零，即

$$\gamma(e^{\alpha d}-1) = 1 \tag{6}$$

式（6）也叫作间隙击穿条件、汤森击穿判据等。式（6）成立时表示：初始电流 $i_0=0$，即没有外界电离条件时，放电电流仍存在（$i\neq 0$），即已进入自持放电。在式（6）中，系数 α 和 γ 都随着 E/p 的增加而增加，当 E/p 达到某一数值时，间隙击穿。式（6）的物理意义为：当一个电子从阴极出发到达阳极时，由于碰撞电离而产生的正离子数应为（$e^{\alpha d}-1$）；这些正离子返回来打到阴极上产生的二次电子数为 $\gamma(e^{\alpha d}-1)$。当电场足够强时，$\gamma(e^{\alpha d}-1)=1$，即在阴极上新产生的电子数代替了原有的初始电子数，使电子发生雪崩增长的过程得以持续下去。当然，二次电子也可能是由光子或亚稳态原子打到阴极上而引起的。

自持放电条件式（6）中只包括 α 和 γ，表明只有 α 和 γ 过程。实际上在放电间隙中还存在正离子碰撞引起的碰撞电离，称为 β 过程。通常 β 过程的影响很小，可忽略不计。

在负电性气体中，存在电子附着过程，即负离子的形成过程，使间隙中的电离程度减弱，从而导致击穿电压升高。这种过程用系数 η 来表示，η 是一个电子在电场方向单位长度上发生附着碰撞的次数。此时的自持放电条件应修改为

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha-\eta}\left[e^{(\alpha-\eta)d}-1\right] = 1 \tag{7}$$

适用范围　汤森放电理论适合气压值较低、pd 值（间隙气压 p 和间隙距离 d 的乘积）较小、电场较均匀的场合，可以解释许多气体击穿现象。如由汤森放电理论可以解释 pd 值对间隙击穿电压的影响，即巴申定律。又如，它还可以解释负电性气体的击穿电压较高等现象。但是当 pd 太大或太小时，汤森放电理论均不大适用。在高 pd 值时，放电通道呈树枝状，放电时延很小，放电电压与阴极材料关系不大或没有关系。这些现象都无法用汤森放电理论来解释，从而推动了另一种气体击穿理论——流注放电理论的发展。当气压 p 很小时，或间隙处于高真空时，电子的平均自由行程很大，不易发生碰撞电离，此时要采用真空击穿的理论。

参考书目

严璋，朱德恒．高电压绝缘技术．2 版．北京：中国电力出版社，2007.

Telegen dingli

特勒根定理

（Tellegen theorem）　以特勒根命名的电路基本定理。1952 年由荷兰人 B. H. 特勒根（B. H. Tellegen）提出。此定理具有相当普遍的适用性，在电路的分析中获得多方面的应用。例如电路中无功功率守恒的证明、互易定理的证明等都可以从特勒根定理出发而得到解决。

特勒根定理用于一个网络　对于集总参数网络，不论其拓扑结构如何，支路由何种元件组成，根据特勒根定理恒有

$$\sum_{k=1}^{b} u_k i_k = 0$$

式中 u_k、i_k 分别是该网络的第 k 个支路的支路电压和支路电流，并假设电压、电流的参考方向一致；b 为网络中全部支路数。这一形式体现出网络中的功率守恒关系。

特勒根定理用于两个网络　两个拓扑结构相同而支路元件组成无须相同的集总参数网络 N 和 $\hat{N}$，若两网络的对应支路编号相同且对应支路电压、电流参考方向假设一致，则

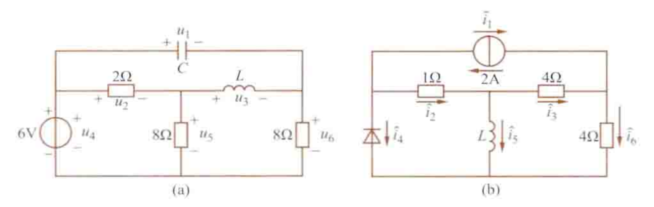
特勒根定理指出：两网络中各对应电压、电流乘积的和为零，即有

$$\sum_{k=1}^{b} u_k \hat{i}_k = 0 \quad 或 \quad \sum_{k=1}^{b} \hat{u}_k i_k = 0$$

式中u_k、i_k（或$\hat{u}_k$、$\hat{i}_k$）为网络 N（或 $\hat{N}$）的第 k 个支路的电压和电流。对于图中两个网络，有

$$\sum u_k \hat{i}_k = u_1\hat{i}_1 + u_2\hat{i}_2 + u_3\hat{i}_3 + u_4\hat{i}_4 + u_5\hat{i}_5 + u_6\hat{i}_6 = 0$$

特勒根定理把一个电路中满足基尔霍夫电压定律的一组电压和另一个具有相同拓扑关系的电路中满足基尔霍夫电流定律的一组电流用数学形式联系起来，定理反映了这两组电压、电流间满足的数学关系。



拓扑结构相同的两个网络

（a）网络 N；（b）网络 $\hat{N}$

特勒根定理揭示的关系与支路元件的组成无关，适用于任何集总参数电路。对于线性、非线性、非时变、时变网络，特勒根定理都普遍成立。

tesila

特斯拉 （tesla） 国际单位制（SI）中磁通密度的单位。特斯拉简称特，符号是 T。将带有 1A 恒定电流的长直导线垂直放在均匀磁场中，若导线每米长度上受到 1N 的力，则该均匀磁场的磁通密度定义为 1T。在 CGS 电磁制中磁通密度的单位是高斯，简称高，符号是 Gs。特斯拉和高斯的换算关系是$1\text{T}=10^4\text{Gs}$。

texing zukang

特性阻抗 （characteristic impedance） 见传输线。

tidai dingli

替代定理 （substitution theorem） 用独立电源替代电路中某个二端元件的定理。当一个二端元件和一个有源网络相连时，则在此确定的工作状态下，可以用一个独立电压源或独立电流源代替这个二端元件，而不影响有源网络中的电压和电流；此独立电压源或电流源的数值和方向与这二端元件上的电压和电流的数值和方向相同。图 1（b）与（c）中示出了应用替代定理将图 1（a）中的二端元件用电源替代的情况。

例如图 2（a）所示电路，a、b 端子右侧接有二端元件——阻值为 R 的电阻，端电压为 4 V，流过电流为 2 A。图 2（b）、（c）分别为将 4 V 电压源和 2 A 电流源替代电阻 R 后的电路，这样替代后 a、b 端左侧网络中的电流和电压均不改变。

替代定理不仅限于用电压源或电流源替代二端元件，也可推广用于替代二端网络（无源或有源），其端口电压、电流可以是任一时间函数。

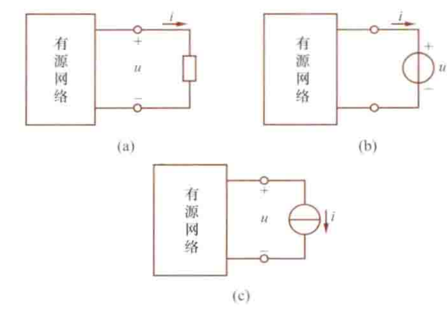


图 1 用独立电源替代二端元件的电路图

（a）原网络；（b）用电压源替代；（c）用电流源替代

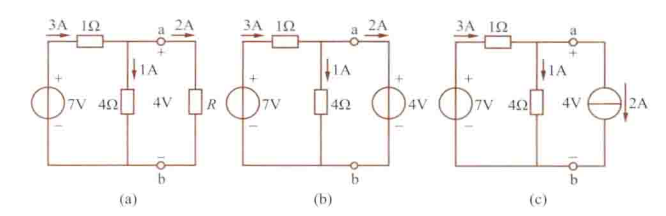


图 2 替代定理的应用举例

（a）原网络；（b）电阻 R 以电压源替代；（c）电阻 R 以电流源替代

利用替代定理可以简化网络，有时可以给网络的分析和计算带来方便。应用替代定理时，要求替代后的电路有唯一解，以及原网络中两侧网络之间无控制关系。（受控源或电感耦合等）

tiaojie dianzu cailiao

调节电阻材料 （materials for regulation resistor） 用于制造变阻器的材料。其作用是调节电流的大小，在稳定性及电阻温度系数方面无严格要求，但要求有较高的机械强度、较好的加工性能、耐磨性能和耐腐蚀性能，同时要求价格便宜。常用的调节电阻材料有铁铬铝合金、镍铬铁合金、铜镍合金、铜铬合金、碳和石墨、水和电解质的水溶液等。

铁铬铝合金、镍铬铁合金 电工技术中应用最广泛的大电流调节变阻器材料。镍铬铁合金具有较高的电阻温度系数，如增加镍铬含量，减少铁的相对含量，则情况有所改善。铁铬铝合金的电阻温度系数优于镍铬铁合金。

铜镍合金、铜铬合金 广泛用于制造中小型电流调节变阻器。

碳和石墨 用于制造大电流变阻器。通常将板状碳或石墨叠合使用，其紧密接触程度随施加的压力而变化，改变压力便可以改变电阻数值。也可使用碳粒。

水和电解质的水溶液 常用于大容量的交流变阻器。其优点是成本低、调节方便。通过改变电解质的浓度或极板间的距离便可以改变电阻值。

tiaoshi chengxu

调试程序 （debugger） 用以排除程序中错误的程序，主要提供追踪、监控等功能。调试程序也称为排错程序。调试程序按照它所需要的环境和结构，可分为在编译程序（或解释程序）中嵌入的调试程序和不依赖于语言的通用交互调试程序。调试程序通常与被调试程序一起运行。

调试程序的功能：①为被调试程序设置和清除执行时的

断点，使程序员可以在断点处查看各种执行的现场信息；②跟踪程序的执行，可以单步或多步执行程序并显示每步的寄存器和状态等信息；③显示和修改指定的寄存器或存储单元的内容；④将控制转换到被检测的程序的某一位置去执行；⑤将可执行程序进行反汇编，即将二进制的机器代码转换成汇编指令；⑥接收并翻译汇编程序，在调试状态下可以输入汇编代码并能被自动翻译成二进制的机器代码；⑦在存储器和磁盘、存储器和打印机等之间进行信息转储；⑧在指定存储器中查找所需要的字符串；⑨在存储器中进行存储块的移动或修改；⑩对端口地址操作，实现对端口地址内容的输入、输出或显示。

程序员可以动态地使用调试程序的功能，检查程序中的错误。调试程序还可以用来研制或修改程序，使用其反汇编和跟踪功能解剖分析程序。

tiaozhiqi

调制器 （modulator） 用调制信号控制载波信号（振幅、频率或相位）三个参数之一瞬时值的电子电路。被控参数为振幅、频率或相位时分别称为调幅器（amplitude modulator）、调频器（frequency modulator）或调相器（phase modulator）。调制器在通信、信号处理和自动控制系统中得到广泛应用。

调幅器 实现调幅的具体电路有多种。图1（a）所示为利用模拟乘法器来实现的原理电路。$u_m(t)$ 为调制信号，$u_c(t)$ 为载波信号，且 $\omega_c \gg \omega_m$，K 为模拟乘法器的增益系数。设 $u_m(t)=U_m\cos\omega_m t$、$u_c(t)=U_c\cos\omega_c t$，则

$$u'_o(t) = KU_cU_m\cos\omega_m t\cos\omega_c t = U'_c\cos\omega_c t \qquad (1)$$

式（1）中，乘法器的输出电压振幅 $U'_c = KU_cU_m\cos\omega_m t$ 受调制信号 $u_m(t)$ 控制，故称振幅调制器，简称调幅器。式（1）又可化为

$$u'_o(t) = \frac{1}{2}KU_cU_m[\cos(\omega_c+\omega_m)t+\cos(\omega_c-\omega_m)t] \qquad (2)$$

式（2）的频谱特性如图1（b）所示，以 ω_c 为中心，两边对称出现上边频信号 $\omega_c+\omega_m$ 和下边频信号 $\omega_c-\omega_m$，二者的振幅相同，故又称平衡调制。

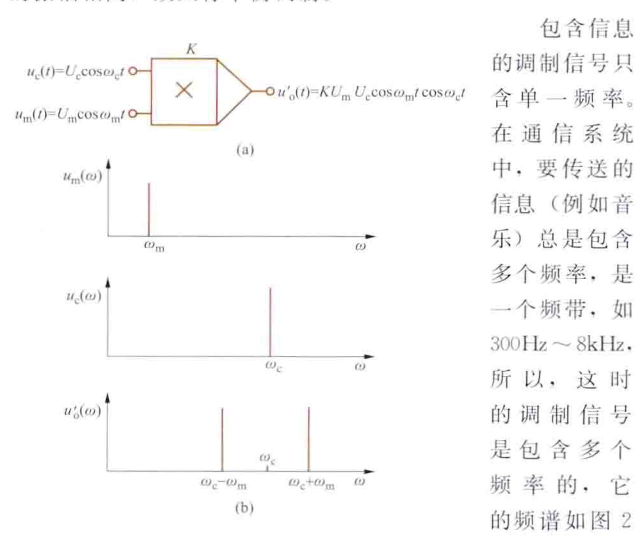


图1 调幅器
（a）原理框图；（b）输出电压的频谱特性

包含信息的调制信号只含单一频率。在通信系统中，要传送的信息（例如音乐）总是包含多个频率，是一个频带，如300Hz～8kHz，所以，这时的调制信号是包含多个频率的，它的频谱如图2（a）所示。若载波信号仍然是 $u_c(t)=U_c\cos\omega_c t$，则乘法器输出的已调制信号 $u_o(\omega)$ 的频谱（取载波频率 $f_c=\omega_c/2\pi=100\text{kHz}$）如图2（b）所示。由图可见，乘法器的输出包含上下两个频边带的信号，两个边带都包含着原始的信号。这种调幅系统又称双边带调制。通信机没有必要将这种双边带调制过的信号都发射到远方，因为这样将大大增加成本和占有频道，为此，有必要在乘法器后面加一个带通滤波器，如图2（d）所示。欲取出图2（b）中的上边带信号抑止下边带信号，带通滤波器的带宽 $\Delta f=8-0.3=7.7\text{ kHz}$，中心频率 $f_0=(100.3+108)/2=104.15\text{kHz}$。

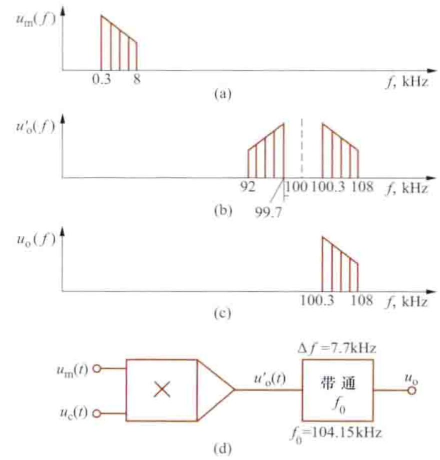


图2 双边带调制的频谱
（a）调制信号 $u_m(t)$ 的频谱；（b）已调制信号 $u'_o(t)$ 的频谱；（c）带通滤波器输出的上边带 $u_o(t)$ 的频谱；（d）取用上边带信号的电路框图

调幅器有多种方案，有串联双二极管调幅电路、晶体三极管调幅电路等。

调频器 调频器电路可分为直接调频和间接调频两类。间接调频的原理是：先对调制信号进行积分，再对载波信号进行调相，其输出即为已调频的信号。间接调频的优点是载波频率稳定，但频移小，电路复杂。直接调频是直接改变振荡回路的元件参数或直接控制振荡器的工作状态来实现调频。它的优点是频移较大，线路简单，但载波频率稳定性较差。图3是利用变容二极管的直接调频电路。图中：V1、L_1、C_1、R_1、R_2、C_2 构成正弦波振荡电路；V2、L_2 和电源 U 组成变容二极管偏置电路；$u_m(t)$ 为调制信号；$u_o(t)$ 为已调频信号；L_2 是高频扼流圈，它阻止高频输出电压 $u_o(t)$ 通过，以免影响调制电压 $u_m(t)$，而允许低频的调制电压 $u_m(t)$ 通过去改变变容二极管V2的两端电压，从而改变V2的电容，达到改变正弦振荡器输出频率的目的。

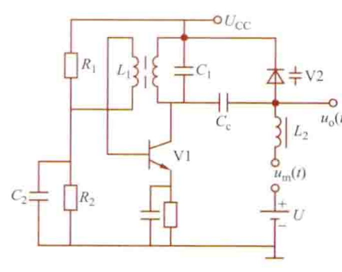


图3 用变容二极管的调频电路

调相器 调相器的电路也可分为直接调相和间接调相两类，图4为利用移相网络来直接调相的原理电路。图中V1组成倒相电路，$u_c(t)$ 为载波电压，集电极输出电压为

$u'_c(t)$，发射极输出电压为 $u_e(t)$，在集极与射极之间接一 RC 移相网络，已调相电压 $\underline{U}_o$ 等于射极电压 $\underline{U}_e$ 与 R 两端电压 $\underline{U}_R$ 的相量和，$u_o(t)$ 与 $u_c(t)$ 之间的移相角为 $\varphi \approx 2/(\omega_c CR)$，可见改变电容 C 之值即可改变移相角 φ。用变容二极管代替电容 C，并用调制电压 $u_m(t)$ 改变变容二极管的电容值，即可获得已调相电压 $u_o(t)$。

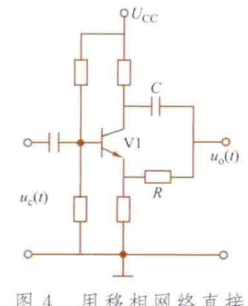


图 4　用移相网络直接调相的电路

tiaozhi yu jietiao dianlu

调制与解调电路　(modulation and demodulation circuit)

用一个较低频率的信号去控制另一个较高频率的信号的某一参数（振幅、频率、相位）的电子电路称为调制电路，实现从已调制信号中恢复原始信号的电子电路称为解调电路。

调制、解调技术广泛用于通信、广播电视、自动控制及检测系统中。在无线通信中被传输的原始信号 $u_m(t)$ 是某人的讲话、音乐等音频信号。音频信号容易被大气层吸收，不易传输到远方。要将音频信号传输到远方，首先需要将音频信号调制到另一个频率高得多的载波信号 $u_c(t)$ 上去，得到一个已调制信号 $u_o(t)$，$u_o(t)$ 通过发射机就能传输到远方去。在远方通过接收机接收到 $u_o(t)$，然后再通过解调电路恢复出原来的音频信号。调制电路的方框图如图所示。图中调制信号 $u_m(t)=U_{mm}\cos\omega_m t$；载波信号 $u_c(t)=U_{cm}\cos\omega_c t$；通常 $\omega_c \gg \omega_m$。调制电路的输出信号 $u_o(t)$ 称为已调制信号。根据已调制信号被调制参数的不同，调制电路可分为振幅调制、频率调制和相位调制三种类型。

(1) 振幅调制电路。实现已调制信号的振幅按调制信号的瞬时值成正比变化的电路，即

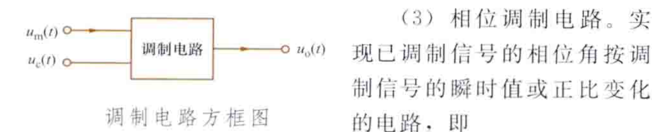
$$u_o(t) = (U_{cm} + KU_{mm}\cos\omega_m t)\cos\omega_c t$$
$$= U_{cm}(1 + m_a\cos\omega_m t)\cos\omega_c t \tag{1}$$

式中 $m_a = KU_{mm}/U_{cm}$ 称为调幅系数，或调幅度。总是满足 $m_a \leqslant 1$。K 为比例常数。

(2) 频率调制电路。实现已调制信号的频率按调制信号的瞬时值或正比变化的电路，即

$$u_o(t) = U_m\cos(\omega_c t + m_f\sin\omega_m t + \varphi_0) \tag{2}$$

式中 m_f 为调频系数。



调制电路方框图

(3) 相位调制电路。实现已调制信号的相位角按调制信号的瞬时值或正比变化的电路，即

$$u_o(t) = U_m\cos(\omega_c t + m_p\cos\omega_m t + \varphi_0) \tag{3}$$

式中 m_p 为调相系数。

实现调制与解调的具体电路见调制器与解调器。

tiecixiezhen dianlu

铁磁谐振电路　(ferro-resonance circuit)

带铁芯的电感和电容组成的电路。在正弦电源激励和电路参数合适的条件下，铁磁谐振电路可产生对基波（其频率为激励频率）、高次谐波或次谐波的谐振现象。电力系统中，如果系统某部分的结构和参数配合不当时，有可能使带铁芯的线圈（空载变压器绕组或电压互感器绕组等）与线路对地电容形成铁磁谐振，从而产生过电压使电气设备的绝缘受到威胁。

由于铁芯的磁饱和现象，铁芯线圈的电感是非线性的。在线性电感和线性电容串联构成的串联谐振电路中，只有改变电源频率至谐振频率才能出现谐振现象；但在铁磁谐振电路中，维持电源频率不变，改变电源电压有效值至某一数值，也可以使电路进入谐振状态。在这种电路里，还可能出现电压值或电流值突变现象，这种现象称为跳跃现象。

谐振现象　图 1 所示为由正弦电压源和铁芯线圈、电容组成的串联谐振电路。图中的电容 C 是常数，电容电压的有效值 U_C 和电流 I 成正比。线圈电压的相位和电容电压的相位基本上相差 180°，因此两电压之差的绝对值 $|U_L - U_C|$ 几乎和电源电压的有效值 U 相等。图 2 为铁芯线圈的伏安特性，U_L 是线圈电压的有效值，I 是线圈电流的有效值。图中伏安特性的形状和铁磁材料磁化曲线的形状类似。图 3 是在考虑铁芯线圈中的损失和电感的非线性情况下的电源电压 U 随电流 I 变化的曲线。当电流 $I=I_0$ 时，电路发生谐振，$U_L=U_C$。电压 U 为极小值。$I>I_0$ 时，$U_C>U_L$，电路呈现容性。$I<I_0$ 时，$U_L>U_C$ 呈现感性。

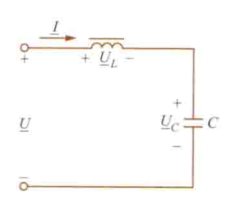


图 1　铁磁谐振电路

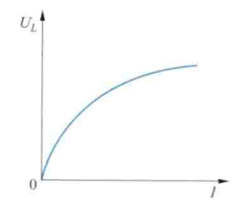


图 2　铁芯线圈的伏安特性

跳跃现象　图 3 中曲线的 AC 段，曲线下倾。这一段曲线，在实际电路中是观察不到的。图 4 为测绘图 3 所示伏安特性的实验线路。图 4 中电源电压的频率维持不变，但有效值可连续变化，其值 U 由电压表测出，电流 I 由电流表测出。图 5 是由图 4 得到的实验结果。当电压 U 由零增大时，电流 I 沿曲线 0A 段上升。一旦电压达到 U_A，工作点跳变到图中 B 点，电流呈现跳跃性增加。此后，工作点一直在曲线 BE 上变动。当电源电压由 U_E 下降时，电流 I 沿曲线 EBC 减少，下降到 U_C 时，工作点由 C 点跳变到 D 点，电流呈现跳跃性下降。电流的跳跃性变化，可由图 4 中的电流表读出。

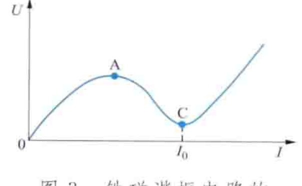


图 3　铁磁谐振电路的伏安特性

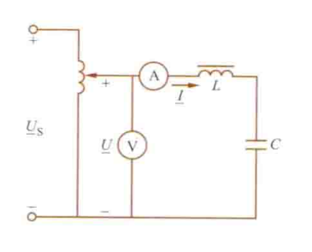


图 4　铁磁谐振电路特性的测试

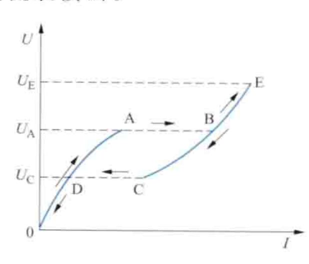


图 5　铁磁谐振电路中的跳跃现象

次谐波　次谐波的频率通常是电源电压频率的1/3、1/5等，或者说它的周期是电源电压周期的3倍、5倍等。它又称作1/3次谐波、1/5次谐波，以说明次谐波的周期。在电路参数的某种配合下，铁磁谐振电路可能出现次谐波。此时，电流或电感电压的次谐波的振幅，可以大于电流或电感电压的基波振幅。

tiecixing

铁磁性

（ferromagnetism）　以铁为代表的元素在外磁场作用下所表现的一种磁性。铁磁性是一种强磁性，其主要特征为：

（1）磁化率很大且随外磁场强度而变化。具有铁磁性的物质（简称铁磁质）在磁化过程中，当外磁场强度增大到一定值时，将出现磁饱和现象，此时磁化强度不再随外磁场强度增加而增加；当外磁场撤去后，铁磁质能保持一定的磁性，呈现剩磁现象。

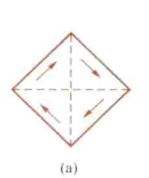
（2）铁磁质有一特征温度 T_C，称为居里温度，在该温度以上，铁磁质转变为顺磁质。不同铁磁质居里温度不同。

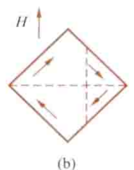
（3）在磁化和去磁化过程中，铁磁质的磁化强度不仅依赖于外磁场强度，而且依赖于它所经历的磁状态的历史，即呈现磁滞现象。（见磁滞回线）

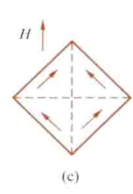
过渡族元素Fe、Co、Ni，稀土元素Gd、Tb、Dy、Ho、Er和某些锕族元素以及它们的合金、化合物所表现的磁性为铁磁性。在过渡族中靠近Fe但不具铁磁性的一些元素的合金也具有铁磁性，如Mn－Cu－Sn，Cr－Pt等。

铁磁性的成因可用磁畴理论加以说明。近代理论和实验都证明，铁磁性主要来源于电子自旋磁矩。

在铁磁质中，相邻电子间有一种很强的“交换耦合”作用，使得在没有外磁场时，电子自旋磁矩在一个个小区域内“自发地”同方向排列起来，这样形成的自发磁化区称为磁畴。在未经磁化的铁磁质中，各磁畴的自发磁化方向不同，因此铁磁质样品在宏观上不呈现磁性，见图（a）。在外加磁场后，样品宏观上呈现磁性，此过程常称为技术磁化。现已知技术磁化是通过磁畴壁移动和磁畴磁化方向转动两种不同过程实现的。图（b）示意在加外磁场后，畴壁的移动使自发磁化方向与外磁场方向一致的磁畴扩大、与外磁场方向相反的磁畴缩小；图（c）示意磁畴自发磁化方向的转动。显然，畴壁的移动和磁畴自发磁化方向转动的结果都将使在外磁场中的铁磁质样品磁化，宏观上呈现磁性。当所有磁畴磁化方向都按外磁场方向排列好，磁化即达到饱和。由于各磁畴中所有电子自旋磁矩已完全排列整齐，它的磁化强度是非常大的，这就是铁磁质磁性强的原因。







磁畴的变化

铁磁质里的掺杂和内应力在外磁场去掉后阻碍磁畴恢复到原来的退磁状态，这就是出现剩磁和磁滞现象的主要原因。

当铁磁质受到强烈震动，或在高温下由于剧烈热运动的影响，磁畴便会瓦解，此时与磁畴形成有关的各种铁磁性性质全部消失。

tiedian cailiao

铁电材料

（ferroelectric materials）　呈现电滞现象的电介质。具有一个或多个铁电相的晶体称为铁电体。铁电相是指在某个温度范围内晶体不仅存在自发极化，而且自发极化强度可随外加电场重新定向的一种状态。晶体的自发极化能被外电场重新定向的这种性质称为铁电性。铁电体的极化强度和外施电场强度之间呈现出电滞现象，类似于铁磁体的磁滞回线，因此，用电滞回线描述电滞现象。铁电体内自发极化方向一致的微小区域称为电畴。电畴随外电场反向而反转时具有某种滞后特性，因而宏观上铁电体就显示出电滞现象。铁电体的重要特征是存在一个结构相变温度 T_C，即晶体由低温的铁电相转变为高温的非铁电相的温度，此温度称为居里点。铁电体的介电、弹性、光学和热学性质等在 T_C 附近出现反常现象。在 T_C 以上顺电区域内，电容率与温度的关系遵循居里-外斯定律。反铁电体的结构与铁电体相近，但相邻的子晶格却是沿反平行方向产生自发极化的，因此，宏观性能上，反铁电体和铁电体既有相同之处，也有不同之处，在某些条件下，如外施强电场可以使反铁电相转变为铁电相。由于铁电体是热释电体的一个亚族，因此，铁电体从本质上来看总是具有压电性和热释电性。

1921年，J. 瓦拉塞克（J. Valasek）首先发现罗息盐（$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$）具有电滞回线这样的铁电性，以后又相继发现了钛酸铅（$PbTiO_3$）、钛酸钡（$BaTiO_3$）和钛锆酸铅（PZT）等三元系和四元系铁电陶瓷以及透明铁电陶瓷等。

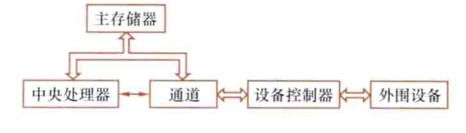
铁电材料按照形态特征和性质可以分为：①铁电单晶体；②铁电陶瓷多晶体；③铁电薄膜；④铁电复合材料。

典型的铁电材料有钛酸钡（$BaTiO_3$）、磷酸二氢钾（KH_2PO_4）等。铁电材料主要用作电容器材料（高介电性的应用）和压电材料。陶瓷电容器已从带引线的单片电容器，向有效电容率为100 000～200 000的片式多层电容器和晶界层电容器发展。此外，在信息存储、图像显示和全息照相等方面亦有应用。

tongdao

通道

（channel）　一种把外围设备和主存储器连接起来的数据通路。用于替代中央处理器对外围设备和数据的输入/输出操作控制。通道与中央处理器、主存储器及外围设备的连接如图所示，双线代表数据线，单线代表控制线。由于中央处理器和通道可以分时使用主存储器，从而实现中央处理机内部运算和外围设备并行操作。



通道连接框图

通道的结构和功能随着机器及所连接的外围设备的不同而差异很大。按通道和中央处理器的独立程度可分为：结合型通道和独立型通道。①结合型通道。在硬件结构上和中央处理器组合在一起，利用中央处理器的某些部件作为通道部件，其结构简单，但通道功能较弱，效率较低。②独立型通道。在硬件结构上和中央处理器完全独立，通道功能强，效

率高，但设备成本也高。

根据通道传送数据方式的不同，通道可分为字节多路通道、选择通道和数组通道三种类型。

字节多路通道　按字节传送数据的操作方式，无论是输入或输出，每传送完一个字节后，通道就与设备控制器断开，而去为别的需要传送数据的设备控制器服务，从而使外围设备交叉使用通道传送数据，因此又称为字节交叉传送。主要用于连接大量的低速或中速的外围设备，例如行式打印机、读卡机、远程终端等。一个字节多路通道，包含多个按字节传送数据的子通道。子通道是指能够执行通道程序，独立执行输入/输出操作的部件。每个子通道可连接一台或多台外围设备，不同子通道的设备可同时工作，相同子通道内一次只允许一台设备与主机交换数据。

选择通道　一个通道可连接多个外围设备，每次操作只能选择一个设备，连续传送数据直至送完。选择通道不再分子通道，一次只能执行一个通道程序。一个设备和主存储器进行数据传送时便独占了整个通道，数据按成组传送，所以又称快速通道。主要用于连接高速的外围设备，例如磁带机等。

数组通道　将字节多路通道和选择通道的优点结合在一起的一种通道结构，也称数组多路通道。数组通道含有多个子通道，可以同时执行多个通道程序，但数据的传送是成组传送（外围设备交叉使用通道传送数据）。这种通道主要用于多个高速旋转的外围设备，例如磁盘。

tongxin kongzhi chuliji

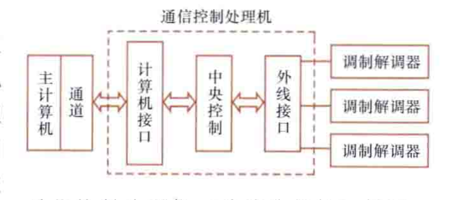
通信控制处理机

（communication control processor）　在计算机网络中，用于通信控制的专用处理机，简称通信处理机。通信控制处理机是主计算机和终端设备接入计算机网络的接口设备，因此又称通信接口处理机。

通信控制处理机有功能较强的指令系统和灵活的中断系统，有较大容量的主存储器和辅助存储器。它的功能比通信控制器、终端控制器等的功能要强得多。当这种处理机取代一般的通信控制器而用于前端的通信控制时，则被称为前端处理机；当这种处理机取代一般的终端控制器或群集器时，则被称为终端处理机。

功能　通信控制处理机实现计算机和终端设备与通信子网的连接，保证通信报文正确而有效地发送、传输、接收和处理。其基本功能如下：①线路控制。控制通信线路的通断、线路状态的监视等。②传输控制。传输规程的实现、报文存储和转发、同步控制及数据流控制等。③终端控制。对终端的选择、识别、接通、操作及释放等。④报文控制。报文自动编号、错误报文的诊断和处理、报文分析和编辑等。

组成　通信控制处理机一般由计算机接口部件、中央控制部件及外线接口部件等三部分组成。作前端处理机用的通信控制处理机的结构框图如图所示。其中中央控制部件是通信控制处理机的主体，与计算机的接口就是与主机通道的接口，类似于外围设备控制器与通道的接口。外线接口部件包括线路接口及其控制，如字符的组合和分解、电信号转接及电气连接等。作为终端处理机用的通信控制处理机，其组成部件的功能不完全与此相同。



通信控制处理机（前端处理机）框图

tongyong zhenlie luoji

通用阵列逻辑

（generic array logic，GAL）　一种包含可编程的“与”逻辑阵列和输出逻辑宏单元（output logic macro-cell，OLMC）的可编程逻辑器件。GAL 的结构如图 1 所示，输出逻辑宏单元 OLMC 的结构如图 2 所示。

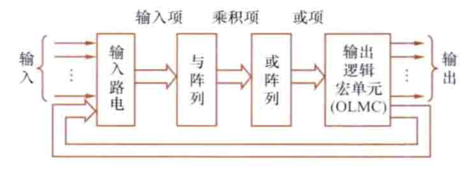


图 1　GAL 的结构方框图

GAL 的输出逻辑宏单元主要由四部分组成：或阵列、异或门、D 触发器和 4 个多路选择器（MUX）。利用异或门的一个输入端，可以控制或门输出逻辑函数的极性。4 个多路选择器分别是：输出多路选择器、反馈多路选择器、输出使能多路选择器和附加多路选择器。通过编程可以使输出逻辑宏单元具有不同的工作方式。

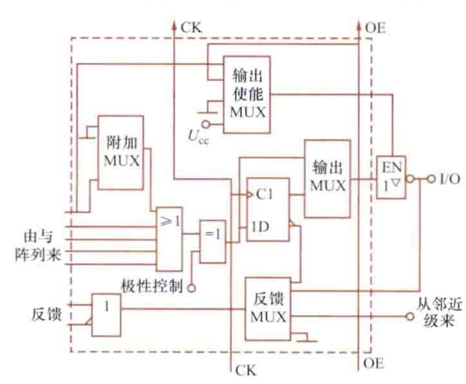


图 2　GAL 的输出逻辑宏单元结构

GAL 器件是在 PAL 基础上发展起来的可编程逻辑器件，它采用了能长期保持数据的 CMOS E^2PROM 工艺，还提供了电子标签、宏单元和结构字等新技术，从而使 GAL 具有电可擦除、可重编程和可加密等性能。GAL 器件的上述特点使其获得了广泛应用，成为低密度可编程器件的代表。但它的规模还不够大，一般可实现简单组合逻辑电路及同步时序逻辑电路。

tongbu jishuqi

同步计数器

（synchronous counter）　能累计或寄存输入脉冲个数且电路中各触发器状态更新是同步进行的一种时序逻辑电路。

同步计数器与异步计数器相比，除电路结构形式不同外，原理、功能、分类等基本相同。图 1 为由三个 JK 触发器组成的三位二进制加法计数器（模 $M=2^3$）。后一级触发器的 JK 端在其前级各触发器的输出 Q 均为 1 时为高电平，计数脉冲 CP 同时加到各触发器时钟 C1 端，触发器状态更新同时进行。

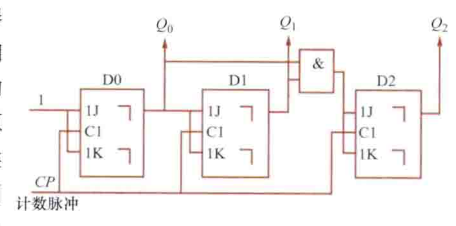


图 1　同步加法计数器电路

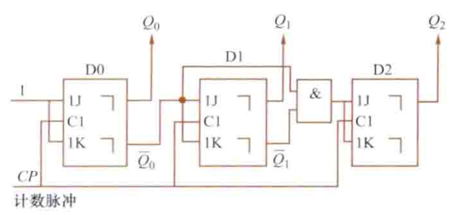


图 2　同步减法计数器电路

图 2 为同步三位二进制减法计数器，与图 1 不同之处是前级各触发器的输出 $\overline{Q}$ 均为 1 时，后一级的 JK 端为高电平。减法计数器状态图如图 3 所示。

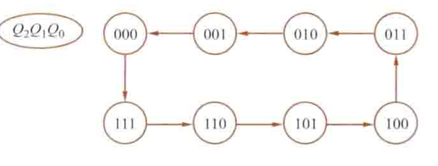


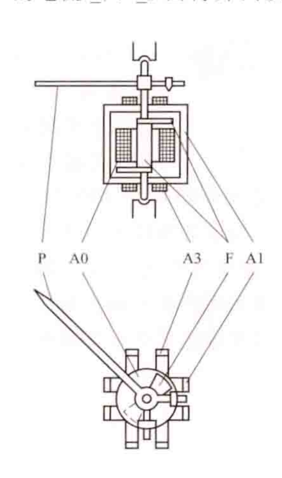
图 3　减法计数器状态图

特点：① 各触发器状态更新同时进行；② 比异步计数器电路结构复杂，需要门电路配合，但同步计数电路延时时间较小。

tongbu zhishiqi

同步指示器　(synchroscope)　指示待并入电网的发电机电压的频率、相位与电网相应电压的频率、相位是否相同的仪器，又称同步表或整步表。同步指示器的标度盘上只标明同相位点，以及指针转动方向与待并网发电机比电网“快”和“慢”的关系。它有电磁系、电动系、感应系、静电系、变换器式、电子式和指示灯式等多种类型。

电磁系同步指示器的结构如图所示。接入静圈 A1、A3 的电流 $\underline{I}_1$、$\underline{I}_3$ 由待并网发电机的三相电压经电阻得来。$\underline{I}_1$ 与 $\underline{I}_3$ 的相位相差 90°，而 A1 与 A3 的空间位置又互相垂直，因此产生旋转磁场。静圈 A0 的电流 $\underline{I}_0$ 由电网电压经电阻得到，产生脉动磁场。此脉动磁场力图使固定在转轴上的 Z 形铁片 F 处于上述两磁场合成能量为最大的位置，即 $\underline{I}_0$ 产生的磁场为最大瞬间旋转磁场所处的位置。



电磁系同步指示器结构
A0、A1、A3—静圈；F—Z 形铁片；P—指针

待并网发电机的电压频率尚未与电网电压同频率时，Z 形铁片带动指针 P 不停地旋转。待并网发电机的电压频率低于电网电压频率时，指针向“慢”的方向旋转；高于电网电压频率时，指针向“快”的方向旋转。当指针不动时，表示待并网发电机的电压频率与电网电压频率完全相同。当指针不动，且指在“快”、“慢”的分界线即同相位点上时，表示待并网发电机与电网同步；此时若待并网发电机输出电压的幅值与电网电压幅值相同，即可闭合开关，将待并网发电机接入电网。

tong

铜　(copper)　金属元素，化学符号 Cu，原子序数 29。纯铜呈紫红色光泽，导电性能优良，在金属导体中仅略次于银。在 20℃ 时，铜的密度为 8.89g/cm^3，电阻率为 $1.55\times10^{-8}\,\Omega\cdot\text{m}$，与银的电阻率 $1.49\times10^{-8}\,\Omega\cdot\text{m}$ 十分接近。但自然界中铜的蕴藏量远大于银，价格远低于银，而且加工性能、焊接性能优良，耐腐蚀性好，无磁性，因此是电工中应用最广泛的一种导电材料。由于铜的导电性对杂质十分敏感，电工中对铜的纯度要求十分严格。用于制造电线电缆（见图）、电机绕组等一般导电零部件时，要求铜的纯度高于 99.90%，含氧量低于 0.06%。在精密场合，如制造电子仪表，耐高温导体、电真空零件等，更应选用高纯铜，其纯度应高于 99.95%，含氧量应低于 0.003%，含铁量应低于 0.000 2%。在一般大气条件下铜不易腐蚀，表面生成的铜绿是和大气中硫化物作用的生成物，能起到一定的保护作用。使用中应避免强烈的酸性环境，否则将导致严重的腐蚀。


通信电缆

根据使用要求还可制成各种铜合金，其导电性虽有所降低，但获得了其他所需的特性。常用的铜合金有：磷青铜，含有磷和锡等杂质，用于制造弹性簧片和接插件；锰铜、康铜等是电阻材料；硬度较高的黄铜是铜锌合金，主要用于制造机械零件，或兼作导电零件。

铜和其他金属组成的复合材料可兼有二者的优点，如铜包铝、镍包铜及用于高频的镀银铜线等。

tujiegou

图结构　(graph)　由有限非空顶点集合 V 和边集合 E 组成的一种数据结构。记作 $G=(V, E)$。顶点具有数据元素，边表示任意两个顶点 x 和 y 之间的关系，记作 $\langle x, y\rangle$。若图 G 中 $\langle x, y\rangle$ 与 $\langle y, x\rangle$ 不等价，则称 G 为有向图；若 $\langle x, y\rangle$ 与 $\langle y, x\rangle$ 等价，则称 G 为无向图，并以无序对 (x, y) 代替两个有序对 $\langle x, y\rangle$ 和 $\langle y, x\rangle$。图中每条边可以有一个称为权的数与之相连，权可以表示两个顶点之间的距离或从一个顶点到另一个顶点的代价，这种带权的图通常称为网。

图 $G=(V, E)$ 中，从顶点 x 到顶点 y 的路径为一顶点序列 $(x=v_{i0}, v_{i1}, \cdots, v_{in}=y)$，其中 $v_{ik}\in V$ $(0\leqslant k\leqslant n)$，$\langle v_{i,j-1}, v_{ij}\rangle\in E(1\leqslant j\leqslant n)$。路径上的顶点都不相同的路径称为简单路径。第一个顶点与最后一个顶点相同的路径称为回路或环。除了第一个顶点与最后一个顶点外，其余顶点都不重复的回路，称为简单回路。若从顶点 x 到顶点 y 至少存在一条路径，则称 x 和 y 是连通的。若图中任意两个顶点都是连通的，则称为连通图。

在计算机中，通常采用数组法和邻接表法等方法来表示图结构。

（1）数组法。用一个一维数组存储各顶点的数据信息，用一个二维数组表示的邻接矩阵表示边的集合。其中邻接矩阵 A 是一个 n 阶方阵（n 为图中顶点的个数）。当边上无权及其他相关信息时，A 的定义为

$$A[i, j]=\begin{cases}1, & \text{若}\langle v_i, v_j\rangle\in E\\ 0, & \text{反之}\end{cases}$$

若为网时，则邻接矩阵可定义为

$$A[i, j]=\begin{cases} W_{ij}, & 若 <v_i, v_j> \in E \\ \infty, & 反之 \end{cases}$$

其中 W_{ij} 为边 $<v_i, v_j>$ 上的权，∞ 表示计算机中可表示的数的最大值。

（2）邻接表法。对图中每个顶点建立一个单链表。在顶点 v_i 对应的单链表中各结点表示以 v_i 为初始点的一条边，再用一个数组存储各顶点的数据信息和指向其对应的单链表的指针。

除上述两种常用表示法外，还有二进制向量表示法、邻接多重表和十字链表等表示方法。

图的基本操作有查找、插入和删除，以及求两个顶点间的路径及路径长度、图的遍历和求连接于某一顶点的边数等。

tuxing shuru /shuchu shebei

图形输入/输出设备 (graphics input/output device)

用来向计算机发送或从计算机接收图形信息的设备。常用的图形输入设备有：数字化板、操纵杆、鼠标器、光笔、控制盘、功能开关（或按键）、扫描仪、数码相机、摄像机、飞行鼠标、数据手套、空间球等。常用的输出设备有：图形显示器、绘图仪、彩色或单色击打式打印机、喷墨打印机、激光打印机、静电打印机、热敏打印机、照相底片记录仪等。在生成、修改或拷贝图形时都要用到图形输入设备或图形输出设备，它是计算机图形学的重要组成部分。

图形输入设备　按其逻辑功能又可分定标器、定值器、检取器、按钮、键盘五种：①定标器：提供二维或三维坐标信息的设备，有图形输入板、鼠标器、扫描仪、数码相机、摄像机、操纵杆、三维声波绘图板、飞行鼠标、数据手套、空间球等。②定值器：提供单个数值的设备，有控制盘等。③检取器：用来识别或挑选所显示图形中感兴趣的对象或子图形的设备，有光笔等。④按钮：用来选择或激活一个事件或过程的设备，由一组称为功能开关的专门按键来实现。图形输入板和鼠标器上一般都带有几个功能按键，这些按键的实际功能由交互式图形软件来确定。⑤键盘：一群按一定格式安排的按钮。在图形系统中键盘可看作一个通用的输入设备，因为它可以执行定标、定值、检取和按钮这几种逻辑功能。在处理文字、数字信息时都要用到，是必配设备之一。

图形输出设备　根据图形输出的特点，与最常用的图形输出设备——图形显示器分类相似，将其他图形输出设备也分为随机扫描式和顺序扫描式两类：①随机扫描式：绘图笔或打印头是随机运动，如笔式绘图仪、平板式绘图仪、混合式绘图仪等。②顺序扫描式：绘图笔或打印头在作水平方向扫描的同时也作垂直方向扫描运动。如各种击打式打印机和非击打式打印机（印刷机）：点阵打印机、电子照相印刷机、静电式印刷机、传热印刷机、喷墨式打印机等。

显示或打印的分辨率、色彩数等是图形输出设备的重要指标。

随着电子工业的飞速发展，图形输入/输出设备朝着高速度、高质量方向发展。如空间球等能提供六个自由度的选择，成为交互图形操作的重要手段。又如图文扫描仪，可高速地输入有灰度或颜色的图文信息，已成为图文自动输入的重要工具。



wate

瓦特 （watt） 国际单位制（SI）中功率的单位。瓦特简称瓦，符号是 W。若以 1J/s 的均匀速率做功，则此时的功率定义为 1W。图为瓦特的画像，功率的单位是以他的名字命名的。



瓦特（James Watt，1736—1819）

wate xiaoshi

瓦特小时 （Watt hour） 电能量的单位名称，简称瓦时。瓦时的符号是 W·h。以 1W 的功率在 1h 内所做的功，定义为 1W·h。

中国等国家规定瓦时是暂时与国际单位制并用的单位，即以功率单位与时间单位之乘积作为能量的单位。在国际单位制（SI）中，能量的单位名称是焦耳，简称焦，符号是 J。1J＝1W·s。1h＝3600s。若时间以小时为单位，则 1W·h＝3600J。通常所谓 1 度电即 1000W·h。

waiwei shebei

外围设备 （peripheral equipment） 计算机系统中，除主机（运算器、控制器和内存储器等）以外的设备。它主要完成信息的输入、输出和成批存储的任务，是计算机和外界（包括人）实现联系的设备。

外围设备根据其在计算机系统中的作用，可分输入/输出设备、辅助存储器、终端设备和脱机设备四类。

输入/输出设备 输入设备是把程序、原始信息以及操作命令送入处理机内进行处理的设备；输出设备则是将处理机处理信息的中间结果和最终结果，以人们可以识别的数字、字符、图形等形式表现出来的设备。输入/输出设备包括打印机、绘图机、显示器、光学识别设备、图形输入设备、汉字输入设备和语音输入/输出设备等。

图 1 所示为多功能打印机，图 2 所示为绘图仪。



图 1 多功能打印机



图 2 绘图仪

辅助存储器 又称外存储器，是相对处理机内的主存储器而言的。它不直接与中央处理器交换信息，而是通过外部控制部件把所需的信息和程序随时成批地送到主存储器，并可把运算中的结果存储起来。外存储器主要有磁盘（软盘和硬盘）、磁带、光盘和 U 盘存储器等。

终端设备 通过通信线路和处理机相连的通用或专用设备。

脱机设备 指不经处理机控制，能在脱机状态下完成数据制备、媒体转换的设备。常见的脱机设备有数据准备设备（如数据录入设备）和脱机打印设备。

外围设备是一种多学科的综合性强且制造难度大的高技术产品。随着科学技术的发展，它在计算机系统中所占的比重将越来越大。从一定意义上来讲，外围设备已成为影响计算机系统性能/价格比、系统可靠性以及计算机推广应用的关键。

wanweiwang

万维网 （world wide web） 见互联网。

wanyongbiao

万用表 （multimeter；AVOmeter） 测量交直流电压、电流及电参数，如电阻、电容、电感等的多功能多量程电表，又称多用表或繁用表。

模拟指针式万用表主要由测量机构、测量线路和转换开关组成。测量机构用以指示被测对象的量值；测量线路则将各种被测对象转换为适合于测量机构的微小直流电流值；转换开关实现对不同测量线路的选择，以适应各种测量要求。模拟指针式万用表采用磁电系微安表头作测量机构。它的满偏电流一般为40～200μA。电表的满偏电流越小，测量机构灵敏度越高，因此组成电压表时的内阻也越高。内阻以欧每伏（Ω/V）表示，乘以量程值即为总内阻值，此值越大，对被测电路的影响越小。

图 1 是一种典型的模拟指针式万用表原理线路图。它利用转换开关接成直流电流、电压，交流电压，直流电阻等的测量电表电路。测量直流电阻的原理线路如图 2 所示。图中电源 U 采用干电池，R_0代表微安表的内阻，R 是可调电阻，R_X 为被测电阻。以 I_X 表示通过微安表的电流，则 $I_X=U/(R_0+R_X+R)$。由此式可见：①被测电阻R_X变化时 I_X 会有变化，从而微安表的指示也变化。可将微安表改按电阻加以刻度，即可直接读出电阻值。②被测电阻R_X越大，I_X越小。$R_X=0$ 时，I_X 最大。所以电阻标尺也称反向刻度，即零阻值标在指针满偏处，且由于 I_X 与 R_X 不成比例，故刻度不均匀。③使用前，先要“调零”，即当 $R_X=0$ 时，调节 R，使指针指在满偏处，以保证每次测量时，$I_0=U/(R+R_0)$ 不变，从而正确显示“零欧姆”。

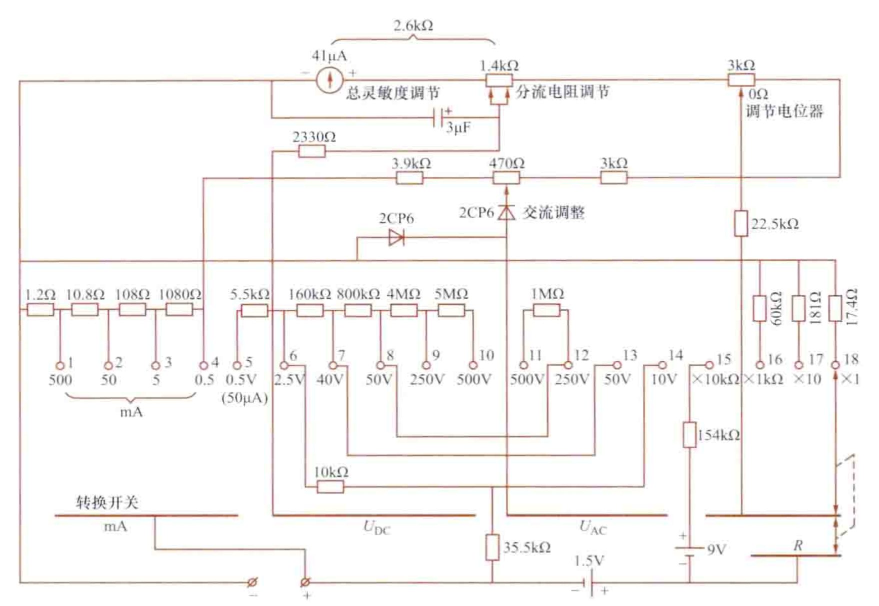


图 1　模拟指针式万用表原理线路

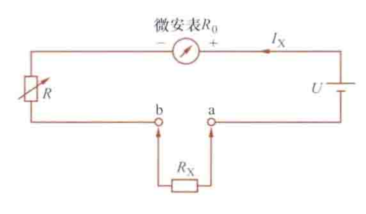


图 2　电阻测量原理线路

wanyong jiaoliu dianqiao

万用交流电桥　(universal AC bridge)　见交流电桥。

wanyong shibobiao

万用示波表　(universal oscillometer)　集数字存储示波器、数字万用表及无纸记录仪的主要功能于一体的数字式电表，又称掌上示波表。

万用示波表可完成被测信号波形的显示、单次快变信号的捕获，信号峰峰值、平均值、有效值、频率、周期等特征参数的提取，信号信息的自动计算与处理，也能测量电压、电流、电阻、二极管正向压降，判断被测电路的开、短路状态等。万用示波表体积小、重量轻，可单手手持操作，携带方便，十分适于电器设备现场安装调试、故障快速诊断排除、仪器设备运行状况监测、日常检查维护以及野外移动作业等。

随着电工测量、大规模集成电路芯片制造等技术的不断进步，万用示波表的性能不断提高，其示波器功能指标已很接近实验室用数字示波器的性能指标，且通过接口可与计算机相连，并能够经网口进入网络化测量系统，进一步扩大应用范围。

wangluo cunchu xitong

网络存储系统　(network memory system)　由多个网络智能化的磁盘阵列和存储控制管理系统构成的实现网络数据存储功能的专用系统。

传统的以服务器为中心的存储方式，即将磁盘阵列（redundant array of inexpensive disks，RAID）直接安装到网络系统的服务器上，已不能满足网络时代对资源共享的需要，越来越多的用户已经从原来的“服务器中心”模式转换为以“数据为中心”的直接联网存储（network attached storage，NAS）和区域存储网络（storage area network，SAN）上。

NAS 存储系统不通过 I/O 总线附属于某个特定的服务器或客户机，它完全独立于网络中的主服务器，可以看作是一个专用的文件服务器。允许客户机与存储设备之间进行直接的数据访问。在局域网环境下，NAS 已经可以实现异构平台之间的数据级共享。

SAN 的核心是光纤通道（fibre channel，FC）技术，此技术是美国国家标准学会（American national standards institute，ANSI）为网络和通道 I/O 接口建立的一个标准集成。通过互联光纤通道交换机构造的高速网，连接所有的服务器和存储设备，让多个主机访问存储设备跟各主机间互相访问一样方便。这些互联的交换机形成了 SNA 的最大特性，即将网络和设备的通信协议与传输物理介质隔离开，使多种协议可在同一物理连接上同时传送，高性能存储体和宽带网络使用单一 I/O 接口，使得系统成本和复杂程度大大降低。

wangluo fenxiyi

网络分析仪　(network analyzer)　测量网络射频、微波及毫米波频段传输和反射特性参数的仪器。电气工程领域的科学研究、装置研发和应用中，涉及的数字通信网络或电缆、高频强电磁脉冲装置的传输特性和反射特性，微波频率下电工材料的复介电常数和复磁导率等的测量，均需要使用网络分析仪。

网络特性参数　对内部结构未知的被测网络，通常选取适当的外部激励信号作用于它的输入端口，在其输出端口接收、观察、分析相应的响应信号，并与已知网络的结构及其特性做比较，从而推测和确定它的内部结构和特性。研究被测网络输入量与输出量之间的某种关系，可得到一组表征该网络特性的参数。在射频、微波及毫米波频段分析和测量网络特性时，多利用 S 参数，原因是 S 参数直接反映网络的传输特性和反射特性，尤其适合描述有源器件的特性。

图 1 (a) 是内阻抗为 Z_i 的信号源信号，经过表征某器件特性的等效电路模型即二端口网络加到负载阻抗 $\underline{Z}$ 的等效电路图，其中 11′是二端口网络的端口 1；22′是二端口网络的端口 2。任意二端口网络的特性可用 S 参数表征，如图 1 (b) 所示。其中，a_1、a_2 分别表示端口 1、端口 2 的入射波，b_1、b_2 分别代表端口 1、端口 2 的反射波。从二端口网络的信号流图可得到 $b_1=S_{11}a_1+S_{12}a_2$；$b_2=S_{21}a_1+S_{22}a_2$，其中，S_{11}、S_{12}、S_{21} 和 S_{22} 为表征二端口网络特性的 4 个 S

参数，又称散射参数；上两式又称散射方程组。

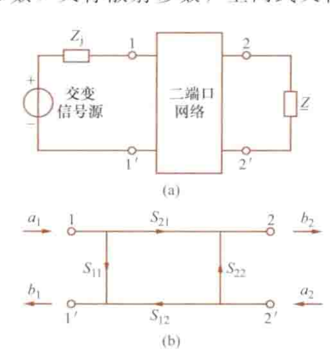


图 1　二端口网络及其信号流图
(a) 二端口网络；(b) 二端口网络的信号流图

为了确定 S 参数，可用一个匹配负载 Z_0 接在端口 2，如此，当端口 2 的入射波 $a_2=0$ 时，由散射方程可得

S_{11}＝反射波/入射波 $=b_1/a_1$；S_{21}＝传输波/入射波$=b_2/a_1$。

以同样方法在端口 1 接匹配负载 Z_0，当 $a_1=0$ 时，得到

$S_{22}=b_2/a_2$；$S_{12}=b_1/a_2$

可见，S_{11} 是在端口 2 匹配情况下端口 1 的反射系数；S_{22} 为在端口 1 匹配情况下端口 2 的反射系数；S_{21} 是在端口 2 匹配情况下的正向传输系数，S_{12} 为在端口 1 匹配情况的反向传输系数。它们均是复数，即包含幅值和相位。通常，S_{11} 和 S_{22} 的模均小于 1，对于有增益的二端口网络，S_{21} 的模大于 1，S_{12} 的模小于 1；而有衰减的二端口网络，S_{21} 和 S_{12} 的模均小于 1。

S 参数的下标中，第一个数字表示波出现的端口；第二个表示波进入的端口。例如，S_{21} 表征在端口 2 出现的波与端口 1 的入射波之比。

S 参数都是在端口匹配的情况下定义的，即它们均是以特性阻抗 Z_0 为参考阻抗。

分类　网络分析仪有标量网络分析仪和矢量网络分析仪之分，前者只能测量、分析网络的幅频特性，而后者除能测量网络的幅频特性外，还能测量网络的相频特性和时延特性。新型矢量网络分析仪借助计算软件，还能获得被测网络的时域特性。

图 2 是某种射频高性能矢量网络分析仪（300kHz～9GHz）的构成原理框图。其中，信号源模块产生激励和本振信号，它们锁相于同一时间基准。激励信号经 S 参数测试模块中的开关功分器、程控衰减器、定向耦合器施加到被测网络上，定向耦合器分离出被测网络的正向入射波信号 R_1、反射波信号 A 和传输波信号 B，由四通道幅/相接收机接收并处理。

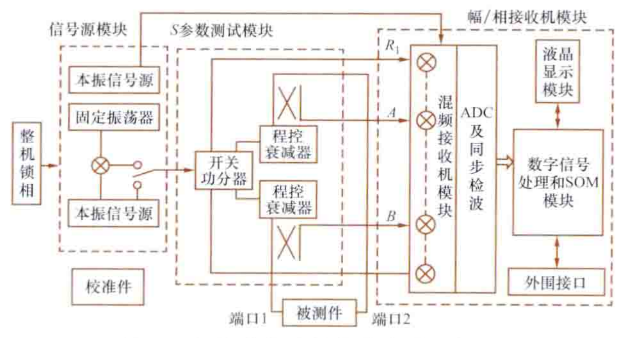


图 2　矢量网络分析仪构成原理框图

测量过程中，开关功分器实现正向 S 参数和反向 S 参数测量的自动转换。以正向 S 参数测量为例，开关功分器中的开关位于端口 1 激励位置，信号源提供的微波信号经开关功分器分为两路，一路作为激励信号，通过程控衰减器和端口 1 定向耦合器的主路加到测试端口，作为被测网络的入射波。被测网络的反射波从端口 1 定向耦合器的耦合端取出，用 A 表示。被测网络的传输波经过被测网络，由端口 2 定向耦合器的耦合端口取出，用 B 表示。来自开关功分器的另一路信号作参考信号，间接代表被测网络的入射波，用 R_1 表示。为减少参考信号与被测网络实际入射波之间的差异，一般需实现参考通道与测试通道的幅值和相位的平衡。新型矢量网络分析仪采用完善的误差修正技术，可做到即使不采用任何硬件补偿措施，也能实现高准确度测量。被测网络的正向 S 参数可用下式求得，即$S_{11}=A/R_1$，$S_{21}=B/R_1$。同理，当开关功分器的开关位于端口 2 激励位置时，可获得被测网络的反向 S 参数，即 $S_{22}=A/R_2$，$S_{12}=B/R_2$。

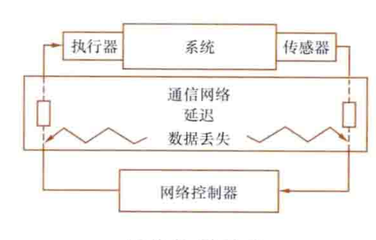
在微波和毫米波甚至在射频频段，直接进行两路信号的矢量运算很困难，甚至不可能。因此，要经过频率变换，将射频和微波信号变换成中频信号，以便于进行 A/D 转换。经频率变换得到的中频信号经 A/D 转换为数字信号后，进入数字电路进行处理。数字电路以嵌入式系统为核心，包括数字信号处理、图形处理等多个处理器功能单元，负责完成系统的测试、测控、误差修正、时域和频域转换、信号分析与处理、多窗口显示等功能。通过采用多用途分布式处理方式，明显提高了数据运算能力和处理速度，使现代矢量网络分析仪已做到近乎实时的网络参数测量。

根据实际用途的不同，还有多种不同的网络分析仪产品，如毫米波矢量网络分析仪、脉冲矢量网络分析仪、多端口矢量网络分析仪、非线性网络分析仪等。

wangluo kongzhi

网络控制　（networked control）　基于通信网络，实现分布式系统中不同物理元件之间的系统信息与控制信号的交换，完成对系统的控制。包括协议、性能、优化设计等内容。

网络控制的特征在于通过一系列通信信道构成一个或多个控制闭环，具体实现网络控制的是网络控制器，它具备信号处理、优化决策和控制操作的功能，可以灵活分布于网络中的不同地点。如图所示，传感器实现对系统过程的状态测量，并将信息通过通信网络传递给控制器。控制器根据获取的信息和控制策略得出控制方案，并通过网络将控制信号发送给执行器，从而实现对系统过程的控制。网络控制已在远程医疗、智能交通、航空航天、制造过程和国防等领域得到了广泛应用，体现了系统控制向网络化、集成化、分布化和节点智能化方向发展的技术趋势。



网络控制系统

协议　采用标准的串行通信协议或专用网络协议，包括多点 RS485、IEEE802.11 无线通信协议等，控制器局域网（controller area network，CAN）协议、以太网协议和现场总线协议等。采用上述协议，使网络控制具有成本低、功耗小、安装与维护简便、可实现资源共享、支持远程操作等特点。

性能　通常由通信网络性能和控制系统性能共同决定。通信网络性能直接影响到网络控制的稳定性和效果，而网络可用带宽是影响通信性能的主要因素，并通常由设备通过网络发送信息的采样频率、要求同步操作的元件数量，所采用的消息机制以及控制信息传输的介质访问控制（medium access control，MAC）协议四个方面决定；而且，通信介质的不可靠性和服务能力受物理限制等原因也会劣化通信性能。因此，通信网络中的数据传输往往存在时延、丢失和时序错乱等问题，对网络控制的实时性、稳定性等性能造成负面影响。

优化设计　设计网络控制系统时，需分析网络传输的最优算法和设备连接的优化设计，控制约束必须考虑通信网络带宽受限等因素，具体控制方法在应用前也需进行相应修正。网络控制系统优化设计方法包括被动分析法和主动设计法。

（1）被动分析法：先在不考虑网络的情况下对控制器进行设计，再进一步考虑网络影响来分析闭环网络控制系统性能。

（2）主动设计法：在考虑通信对网络控制系统影响的基础上进行控制器设计，再构建相应模型并进行系统分析。由于在控制器设计和系统分析中充分利用了通信网络信息，所得分析结果的保守性更低，且控制策略也更具合理性。

为了提高网络控制性能，在网络控制的其他方面也在积极地进行理论研究和探索，包括调度协议，系统体系结构，网络控制实时性、可靠性、互操作性和安全性，以及网络一体化设计领域等。

参考书目

邱占芳，杨春雨．网络控制系统分析与控制．北京：科学出版社，2009．

wangluo ruanjian

网络软件　（network software）　配置在计算机网络中，用于支持网络通信、资源共享和网络管理的软件。（见计算机软件）

分类　有网络协议软件、网络通信软件和网络管理软件三种。

网络协议软件　实现网络各层协议的程序的集合。根据国际标准化组织（ISO）所建议的*开放系统互连参考模型*（OSI/RM），除物理层外，网络协议软件可由数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层和应用层六个层次的网络协议软件组成。其中：会话层及会话层以下的协议软件都是面向通信的，用于实现不同开放系统中对等实体之间的通信，表示层协议软件是面向信息表示和转换的，而应用层协议软件则用于向应用实体提供多种公用和专用服务。

每层协议软件通常是由若干个进程（发送进程、接收进程和接口进程等）和相应的协议元素队列（发送队列、接收队列等）所组成。其主要任务是实现本层协议所规定的功能以及上、下层的接口功能。

传输控制协议/因特网互联协议（transmission control protocol/internet protocol，TCP/IP）是因特网最基本的协议，是国际互联网络的基础。TCP/IP 定义了电子设备（如计算机）如何连入因特网，以及数据如何在它们之间传输的标准。从协议分层模型方面来讲，TCP/IP 由四个层次组成：网络接口层、网络层、传输层、应用层。每一层都呼叫它的下一层所提供的网络来完成自己的需求。

网络通信软件　实现开放系统与本地或远程终端或附属计算机通信的软件。网络通信软件通常由三部分组成：①线路缓冲区管理程序。管理线路缓冲区的分配和释放。②线路控制程序。按照线路传输控制规程，控制信息的发送和接收。由于一台主机所连接的各通信线路可能采用不同的规程，因而需相应地配置多种传输控制规程的软件。③报文管理程序。用于形成报文、管理报文的发送和接收。

为方便主机用户与远程终端或远程计算机通信，在主机中还应提供远程通信的存取方法。常用的存取方法有：①基本远程通信存取方法，即利用各种命令（读、写等）来实现用户程序与远程终端之间通信的存取方法；②排队远程通信存取方法，即以报文队列形式实现用户程序与远程终端之间通信的存取方法；③远程通信存取方法，即根据控制块和报文标题中所包含的信息，来控制用户程序与远程终端之间通信的存取方法；④虚拟远程通信存取方法，即采用该方法和网络控制器内的网络控制程序两级方式来实现用户程序与远程终端之间通信的存取方法。

网络管理软件　对计算机网络的配置、状态和用户等进行管理的软件。它提供了监控、协调和测试各种网络资源的手段。必须遵循专门的网络管理协议。公用管理信息协议是一个用于网络管理的开放系统互连（OSI）模型，它定义了五大网络管理功能：记账管理、配置管理、故障管理、性能管理及安全性管理。由于公用管理信息协议比较复杂，因此在数据网的管理中，使用更多的是简单网络管理协议。其功能有：①网络拓扑结构映像；②事件跟踪报警；③传输监视；④网络诊断；⑤报告生成及历史记录管理和趋势分析等。需要配置一台专用工作站运行网络管理软件，网络管理员通过网络管理工作站监视整个网络的运行状况。各被管实体的代理程序负责信息的收集及预处理，网络管理软件采用通信方式周期地将各代理程序收集的网络管理信息存于自己的管理信息库中。

网络控制方式　有客户/服务器方式及对等方式两种。

客户/服务器方式　利用微机来取代多用户机的终端，使原来由多用户机完成的许多终端型作业，改由各微机自行完成。多用户机则从主要处理终端型作业，转向为各个联机微机（称为客户工作站）提供更高层次的服务，而成为服务器。随着微机性能的提高，亦可由高档微机担当服务器。客户/服务器方式在逻辑上属于星形结构，服务器是网络的中心，其物理结构既可是星形结构，亦可是公共总线结构。

客户/服务器方式的优点：①对大多数用户任务可实现分布式处理。②把通常对终端型作业的处理与对共享资源和用户通信的管理分开，有效地提高了服务器和工作站的效率。③网络实现简单，服务器担负解决一系列复杂的技术问题的任务，工作站仍可应用简单的微机。缺点：①可靠性低。服务器故障将导致整个网络瘫痪。②易出现瓶颈现象。当频繁访问服务器时，使响应时间增长。③可扩充性差。它受到服务器的硬件结构和软件能力的限制。尽管如此，20 世纪 80 年代及以后推出的局域网，大多数仍采用客户/服务器方式，如 Novell 网、FastEthernet 网、ATM 网等。

对等方式　为了克服上述缺点，可将网络控制分散到各开放系统上而形成对等控制方式。网络上的每个开放系统既可作为顾客与其他系统进行通信、访问该系统的共享资源，又起着服务器的作用，管理本站的共享资源，将它们提供给网络上其他顾客共享。对等方式的优点：①平等性。网络中所有系统皆处于平等地位，无主次之分。②可靠性。系统中无中央控制机构，因此，任一系统的失败，都不会给整个系统带来严重影响。③易扩充性。网络的扩充所受到的限制较少，且不易出现瓶颈现象。其缺点是实现复杂，对等方式属于分布式控制方式，系统中必须引入分布式通信、分布式同步控制等技术。

发展方向　网络软件随着计算机技术的发展和网络应用的普及，不断地向纵深发展。其主要发展方向有：分布式处理，宽带综合业务数字网，协议的描述、验证与测试等。

分布式处理　具有硬件资源分散、数据资源分散、网络控制分散和任务并行处理四个特征的处理技术。为实现分布式处理，网络中必须配置分布式操作系统和分布式程序设计语言及其编译程序。分布式处理可按应用领域划分为：分布式数据处理、分布式控制、分布式计算以及其他（如分布式人工智能）等。

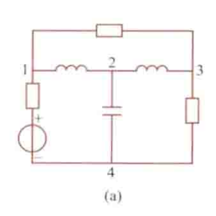
宽带综合业务数字网　一种可方便地传送数据、图形、图像、视频、话音等综合业务信息的数字网络，是计算机网络的发展目标，无论是哪种计算机网络，最终都将纳入宽带综合业务数字网中。

协议的描述、验证与测试　协议的描述是指利用形式描述技术，将协议的概念模型变为精确的规格说明；协议的验证是对协议的行为是否满足要求的证明；网络软件标准化测试是为了确定被测对象与协议标准一致的程度，或称为一致性测试。

wangluo tulun

网络图论

（network graph theory）　应用图论研究网络的几何结构及其基本性质的理论。图论是离散数学的一个分支，它的研究对象是从实际问题中抽象出来的用节点（顶点）和支路（边）构成的线图（graph），简称为图。例如图1（a）中的电网络，其几何结构可表示成相应的线图，如图1（b）所示。在线图中忽略了电路元件的性质，边的长短与弯曲度都不重要，突出的是节点和支路之间的连接关系。图2是一公路交通网络的线图，含有8个节点（城市）和13条支路（公路）。边上注的字（加权）表示公路长度。用线图表示的这种连接关系以及由此产生的全部几何性质又统称为拓扑性质，故网络图论又称为网络拓扑。



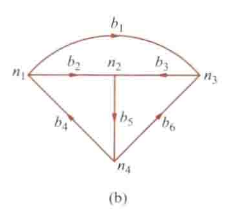


图1　电网络及其线图

（a）电网络；（b）线图

图论起源于1736年数学家L. 欧拉（L. Euler）求解哥尼斯堡七桥难题。1847年G.R. 基尔霍夫（G. R. Kirchhoff）首次用“树”的概念列出电路方程，并为电网络的拓扑分析奠定基础。20世纪中叶以后图论应用日益扩大，涉及网络分析与综合、计算机辅助设计、电路布图、信号流图、电力系统、建筑施工以及最短路径与最大流等方面。随着计算机应用的普及，图的算法设计成为引人入胜的课题。设计有效算法是推广图论应用的关键。衡量算法有效性的主要尺度是运算时间。运算时间可用计算复杂性代替，后者是线图规模（如图的节点数）的函数。

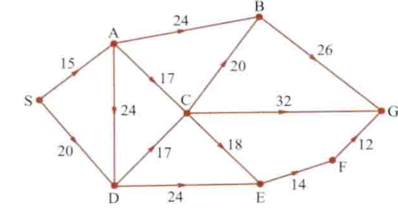


图2　公路交通网络的线图

基本概念

线图　节点和支路的集合。支路两端是节点，线图用图G表示，见图3（a）。节点间相互连通的图称为连通图，支路上标定方向的图称为有向图，否则称为无向图。

子图　由图G中部分节点和支路构成的图称为G的子图，见图3（b）。

回路　图中形成闭合路径的支路集合称作回路。如图3（c）中的$b_2b_4b_5$和$b_3b_5b_6$。

树　图G的一个连通子图，包含G的全部节点但不含任何回路，称为G的树，如图3（d）所示均为G的树。选定一个树后，属于树的支路称为树支，其他支路称为连支。在n个节点，b条支路的连通图G中，树支数为$n-1$，连支数为$b-n+1$。

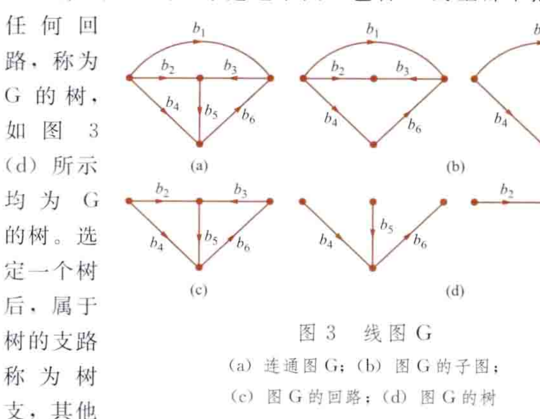


图3　线图G

（a）连通图G；（b）图G的子图；

（c）图G的回路；（d）图G的树

割集　连通图G的一个支路集合，移去这些支路，将使图分为两个不相连部分（孤立节点也算作一部分），若保留割集中的任一支路，则图仍是连通的，这个支路集合称作割集，图4（a）、（b）、（c）中虚线所示为图G的三个割集。

基本回路　选定连通图G的任一树，每加上一个连支，便形成包含该连支，其余均为树支的回路，选定回路方向与所含连支方向一致，这个单连支回路叫做基本回路。在图1（b）中选定b_4、b_5、b_6为树（图5中用实线表示），则三个基本回路c_1、c_2、c_3如图5（a）、（b）、（c）所示。

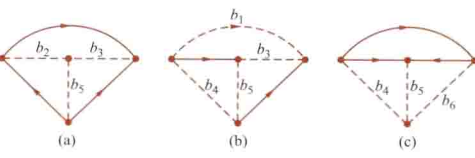


图4　线图G的三个割集

基本割集　选定连通图的任一树，每一树支和某几个连支可组成一个割集，选定割集方向与所含树支方向一致，这个单树支割集叫作基本割集。在图1（b）中，选定b_4、b_5、b_6为

树，其三个基本割集 k_1、k_2、k_3 如图 6（a）、(b)、(c）所示。

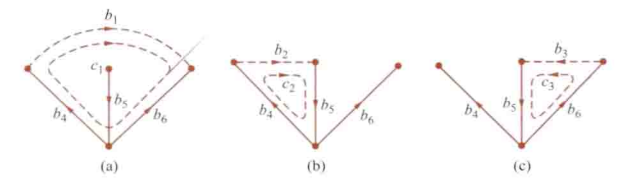


图 5　对应树 b_4、b_5、b_6 的三个基本回路

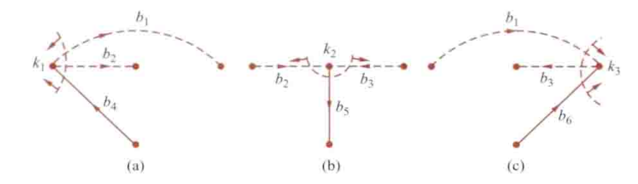


图 6　对应树 b_4、b_5、b_6 的三个基本割集

在网络分析中，选用不同的独立变量形成不同的分析方法。常用的节点法，回路法和割集法就是分别选用节点电压、回路电流（连支电流）和割集电压（树支电压）为独立变量的。它们的未知量数分别是 $n-1$，$b-n+1$，$n-1$ 个。利用树的概念可以方便地确定电路中的独立变量，系统化地列出独立的电路方程。这是图论用于网络分析的突出优点。

线图的矩阵表示　线图中节点与支路的关系、回路和割集与支路的关系以及其他拓扑性质可通过矩阵来描述。图论中经常用到的三个矩阵是：①关联矩阵；②基本回路矩阵；③基本割集矩阵。

关联矩阵 $\boldsymbol{A}$　描述有向图节点（参考点除外）与支路关系的矩阵，即

$$\boldsymbol{A}=[a_{ij}]_{(n-1)\times b}$$

其中

$$a_{ij}=\begin{cases}1(\text{或}-1), & \text{支路 } b_j \text{ 和节点 } n_i \text{ 关联，且离开(或指向)} n_i \\ 0, & \text{支路 } b_j \text{ 和节点 } n_i \text{ 不关联}\end{cases}$$

例如，图 1（b）的关联矩阵 $\boldsymbol{A}$（以 n_4 为参考点）如下

$$\boldsymbol{A}=\begin{matrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{matrix}\overset{\begin{matrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \end{matrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}}$$

基本回路矩阵 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}$　描述基本回路与支路关系的矩阵。当选定一树，其基本回路数为 $c=b-n+1$，则

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}=[b_{ij}]_{c\times b}$$

其中

$$b_{ij}=\begin{cases}1(\text{或}-1), & \text{支路} b_j \text{ 在基本回路} c_i \text{ 中，且与} c_i \text{ 方向一致(或相反)} \\ 0, & \text{支路 } b_j \text{ 不在基本回路} c_i \text{ 中}\end{cases}$$

例如，在图 1（b）中，支路排列按先连支后树支，对应树 b_4、b_5、b_6 的基本回路矩阵 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}$ 为（见图 5）

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}=\begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{matrix}\overset{\begin{matrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \end{matrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}}$$

基本割集矩阵 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}$　描述基本割集与支路关系的矩阵。当选定一树，基本割集数为 $n-1$，则

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}=[q_{ij}]_{(n-1)\times b}$$

其中

$$Q_{ij}=\begin{cases}1(\text{或}-1), & \text{支路 } b_j \text{ 在基本割集 } k_i \text{ 中，与 } k_i \text{ 同方向(或反向)} \\ 0, & \text{支路 } b_j \text{ 不在基本割集 } k_i \text{ 中}\end{cases}$$

例如，在图 1（b）中，支路排列按先连支后树支，对应树 b_4、b_5、b_6 的基本割集矩阵 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}$ 为（见图 6）

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}=\begin{matrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{matrix}\overset{\begin{matrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \end{matrix}}{\begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}$$

同一个图（支路排列按先连支后树支）中 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}$ 三矩阵间存在下列关系。利用矩阵运算方法，将矩阵写成分块形式，即

$\boldsymbol{A}=[\boldsymbol{A}_{11},\ \boldsymbol{A}_{12}]$，$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}=[\boldsymbol{U}_l,\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{f}12}]$，$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}=[\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}11},\ \boldsymbol{U}_t]$

其中 $l=b-n+1$，$t=n-1$，$\boldsymbol{U}_l$、$\boldsymbol{U}_t$ 分别是 l、t 阶单位矩阵，则有

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}=0$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}=0$$

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}11}=-\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}12}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{A}_{12}^{-1}\boldsymbol{A}_{11}$$

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{A}_{12}^{-1}\boldsymbol{A}$$

上式表明已知 $\boldsymbol{A}$ 矩阵后，即可求得 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{f}}$ 和 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{f}}$。

描述线图的矩阵尚有许多，包括在开关网络里用到的路径矩阵，通信网络里用到的邻接矩阵、关系矩阵等。

电网络方程　用上述矩阵可系统地表达电路的基本定律和列写网络方程，并适于计算机辅助分析。

以列写节点电压方程为例。若把电路中的各支路电流、支路电压和节点电压分别记为 $\underline{\boldsymbol{I}}$、$\underline{\boldsymbol{U}}$、$\underline{\boldsymbol{U}}_n$ 的列相量，则可写出以矩阵形式表示的基尔霍夫电流定律（KCL）和电压定律（KVL）

$$\boldsymbol{A}\underline{\boldsymbol{I}}=\boldsymbol{0}\qquad(\text{KCL})$$

$$\underline{\boldsymbol{U}}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\underline{\boldsymbol{U}}_n\qquad(\text{KVL})$$

为了方便分析，设每一支路是由导纳、电流源、电压源组合而成的复合支路（见图 7），则可写出矩阵形式的支路约束方程

$$\underline{\boldsymbol{I}}=\underline{\boldsymbol{Y}}\,\underline{\boldsymbol{U}}-\underline{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{S}}+\underline{\boldsymbol{Y}}\,\underline{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{S}}$$

式中 $\underline{\boldsymbol{Y}}$ 为支路导纳矩阵；$\underline{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{S}}$ 和 $\underline{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{S}}$ 分别为支路的电流源相量和电压源相量。综合以上各式，可推导出以矩阵形式表示的节点电压方程

$$(\boldsymbol{A}\underline{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})\,\underline{\boldsymbol{U}}_n=\boldsymbol{A}\,\underline{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{S}}-\boldsymbol{A}\,\underline{\boldsymbol{Y}}\,\underline{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{S}}$$

令 $\underline{\boldsymbol{Y}}_n=\boldsymbol{A}\,\underline{\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$，称 $\underline{\boldsymbol{Y}}_n$ 为节点导纳矩阵；$\boldsymbol{A}\,\underline{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{S}}-\boldsymbol{A}\,\underline{\boldsymbol{Y}}\,\underline{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{S}}$ 为注入各节点的等效电流源相量。$\underline{\boldsymbol{U}}_n$ 解得后，可进一步求各支路电压和支路电流。

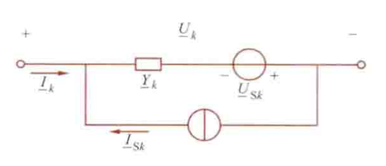


图 7　第 k 支路的复合支路

其他以矩阵形式表示的回路法、割集法，推导亦大同小异。

参考书目

江缉光，刘秀成．电路原理．2版．北京：清华大学出版社，2007．

wangzhuang shujuku

网状数据库 (network database)　采用网状原理和方法，以网状数据模型为基础建立的数据库。一般是指由网状数据库管理系统产生的数据库。网状数据模型是以记录类型为结点的网络结构，即一个结点可以有一个或多个下级结点，也可以有一个或多个上级结点，两个结点之间甚至可以有多种联系，例如“教师”与“课程”两个记录类型，可以有“任课”和“辅导”两种联系，称之为复合链。两个记录类型之间的值可以是多对多的联系，例如一门课程被多个学生修读，一个学生选修多门课程。

网状数据库管理系统大都以数据系统语言协会(CODASYL)数据库任务组(DBTG)的报告为蓝本进行设计，对数据库的描述采用化整为零的办法，先描述各个记录类型，再把记录类型之间的联系分别描述成两两记录的联系，称之为系(set)，并加以命名。由于系的概念在(DBTG)的报告中严格定义成记录值之间一对多的联系，前者叫首记录，后者叫属记录，即一个首记录值对应多个属记录值，因此必须把模型中多对多的联系通过添加适当的结点改造成一对多的联系。新添加的结点称为引入的联结记录型。一个网状数据库模型可以用系型的集合来表示。

weibo dianziguan

微波电子管 (microwave tube)　工作于微波波段的真空电子器件。微波通常指频率在300MHz～3000GHz，对应于波长在1m～0.1mm之间的电磁波。微波电子管是随着微波波段的开发利用而发展起来的，在第二次世界大战期间微波雷达出现后迅速得到应用。20世纪50年代以来，微波技术在微波中继通信、卫星通信、地面电视广播、卫星电视广播、导航、工业和民用加热等方面得到广泛应用。

微波电子管包括三类原理不同的器件，即静电控制微波电子管（微波三极管和四极管）、普通微波管和新原理器件。

(1) 静电控制微波电子管。它是在静电控制电子管的基础上发展起来的。进入微波波段后，信号周期（约为0.001～1ns）已变成可以同电子渡越电极的时间相比拟，甚至更小。为使普通静电控制电子管工作于微波波段必须减小渡越时间。采用的方法有：减小极间距离并采用平面结构（现代微波管的极间距离最小可达0.025mm）；电极之间加比较高的电位；改变电极结构等。

(2) 普通微波管。尽管采取了上述措施，当微波三极管、四极管在更高频率下工作时，仍存在严重问题，如阴极发射电子密度不足，栅极电子负载增加以及效率降低等。为了进一步提高工作频率，自20世纪30年代开始，人们从克服电子渡越时间效应转向设法利用电子渡越时间效应形成电子注密度调制，从而研制了多种实用的普通微波管。这种普通微波管利用电子在相当长的渡越时间内形成电子注密度调制，产生和放大微波信号。属于这一类的有：磁控管、正交场放大管及其他正交场器件；直射速调管和反射速调管；行波管和返波管等。

(3) 新原理器件。20世纪60～70年代以来出现了一些新原理的毫米波、亚毫米波真空电子器件，如回旋管、自由电子激光器等。随着半导体技术的发展，低频小功率微波电子管已逐渐被半导体器件所取代。20世纪70年代以来日本首先研制出一种静电感应晶体管（static induction transistor，SIT）。此种管子工作频率已达几GHz数量级，是一种很有发展前途的固态微波器件。即使如此，大功率、高频率、宽频带微波电子管仍继续得到应用和发展。

weichuliqi

微处理器 (microprocessor)　由一片或几片大规模集成电路组成的中央处理器。其内部有控制器、运算器、寄存器组、数据和地址总线，能完成取指令、执行指令、算术和逻辑运算，以及与外界存储器或输入/输出接口交换信息等操作。微处理器是一种通用芯片，配以存储器和外围电路芯片可组成单板机或微型计算机。

微处理器的发展以其运算字长的增长为主要标志。自1971年美国英特尔（Intel）公司首次推出4位字长的微处理器以来，已经历了4位、8位、16位、32位、64位字长微处理器五个阶段。随着字长的增加，电路集成度、运算速度和控制功能也不断增加。微处理器芯片能集成近千万个晶体管，主频高达500MHz以上。为了使计算机的运算速度得到提高，在不明显增加功耗与成本的情况下，在微处理器与主内存之间插入一种容量不大的高速缓冲存储器，根据计算机规定的管理策略，可将程序执行期间被频繁存取的指令和数据存储其中，从而减少微处理器存取主内存的时间，加快速度。微处理器的发展速度很快，其主要原因为：①随着半导体微电子技术的发展，器件本身的特性大幅度提高；②出现了以精简指令系统计算机（reduced instruction set computer，RISC）为代表的微处理器体系结构；③超大规模集成电路（very large scale integration，VLSI）器件的计算机辅助设计技术使设计质量和效率大为提高。

微处理器功耗少、体积小、可靠性高、价格低，故被广泛用于仪器仪表、通信设备、民用电器及微型计算机中。

weifen jifen celiang xitong

微分积分测量系统 (differentiating integrating measuring system)　以微分和后继的积分环节作为电压转换装置组成的高电压测量系统，简称为D/I系统。这种分压方式较多应用于冲击高电压测量中。

图示的D/I系统，由C_d和R_d组成高压微分环节。C_d是高压充气标准电容器或其他的高压低电容量脉冲电容器。R_d是同轴射频电缆的匹配电阻，其阻值一般为50Ω或75Ω。积分环节可采用无源、有源积分器或特性更好的无源有源混合积分器。

微分积分测量系统

1—阻尼电阻；2—同轴射频电缆；3—屏蔽箱（室）；4—积分器；5—数字示波器

微分后再积分可使输出电压u_o恢复为输入电压u_i的波形，而电压幅值大为下降。电路分

析表明，测量系统的稳态分压比 k 由 $k=T_i/T_d$ 决定，式中 T_i 为积分环节的时间常数；T_d 为微分环节的时间常数。

在很宽的频率范围内，T_d 越小则微分环节中 C_d 的容抗越大于电阻 R_d。而 T_i 越大则在积分环节中电容元件的容抗越小于电阻元件。上述条件下，k 则越大。由此可以理解D/I系统的分压作用。

对于实际的微分器和积分器来说，T_d 过大会造成冲击电压波前时间的测量误差，T_i 太小会造成冲击电压半峰值时间的测量误差。T_d 过小或 T_i 过大又可能造成输出信号太小，使示波器的输入电压太低，以致信噪比太低。

在现场测量中，微分器的输出信号电压，也可由套在 C_d（如套管）接地线的宽带电流互感器（如Pearson线圈）供给。

与一般的阻尼型电容分压器相比，D/I系统具有以下优越性：①由于 C_d 的电容量很小，对电源的负荷效应微弱。②D/I分压方式的采用，使普通的商用高压充气标准电容器用于冲击电压的测量成为可能。③它与数字存储示波器相连接时，常可省去二次分压环节。④具有足够高的响应特性。

weifenqi

微分器

（differentiator） 把集成运算放大器连接成能实现输出电压与输入电压对时间的导数成正比的放大器。它广泛用于信号处理系统中，作为脉冲产生和超前控制的单元。

微分器的基本电路如图1所示。设运算放大器、电容 C 和电阻 R 均为理想元件，则运算放大器的反相输入端为"虚地"。按虚断和虚短（见加法电路）的概念得电压放大倍数为

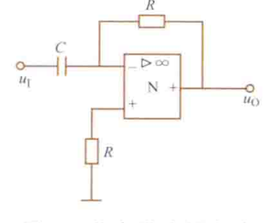


图1 基本微分器电路

$$\frac{U_O(s)}{U_I(s)}=-\frac{R}{1/sC}=-sCR \tag{1}$$

将式（1）写成时域形式为

$$u_O=-CR\frac{du_I}{dt} \tag{2}$$

式（2）表示输出电压与输入电压对时间的导数成比例，但冠以负号。式（1）可写成

$$\frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_I}=-j\omega CR \tag{3}$$

式（3）表示当 $\omega CR=1$ 即 $f=\frac{1}{2\pi CR}$ 时，$\left|\frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_I}\right|=1$，即电压增益 $20\lg\left|\frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_I}\right|=0$dB。图1所示电路的幅频特性伯德图如图2所示。由图2可见，当 $f\to\infty$ 时，电压增益趋于正无穷大。也就是说，此电路对于输入信号中的高频分量有很高的电压增益，即对于高频分量很灵敏。因此，对图1所示电路，如果输入端没有很好屏蔽，则很容易引进高频干扰电压，并得到高倍数的放大，从而导致微分器无法正常工作。解决的措施之一是

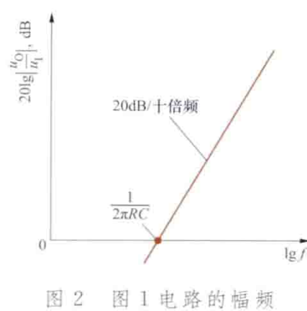


图2 图1电路的幅频特性伯德图

在输入端串联一个低值电阻，如图3中的 R_1 所示。此时电路的电压放大倍数变为 $\frac{U_O(s)}{U_I(s)}=-\frac{sCR}{1+sCR_1}$，对应的幅频特性伯德图如图4中的折线abcd所示。引入电阻 R_1 后高频段的电压增益变为一恒值，从而抑制了高频分量的电压增益。

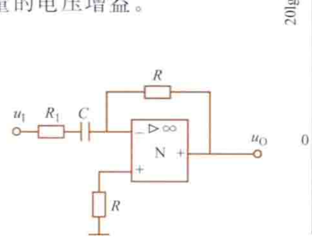


图3 输入端串联低值电阻的微分器电路

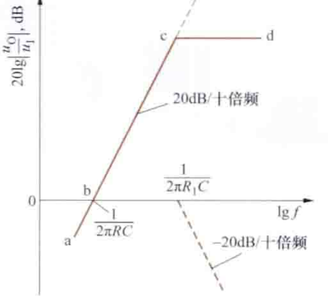


图4 图3电路的幅频特性伯德图

weixing jisuanji

微型计算机

（microcomputer） 以微处理器为核心，以较通用的总线结构为基础，配以只读和随机存储器、辅助存储器以及多种设备接口部件而构成的计算机系统，简称微机。这类计算机不仅具有开放式的硬件系统，也具有开放式的软件系统，可根据用户的不同需求，选配合适的软硬件模块。由于体积小，功耗低，适应性强，性能价格比高，因而使用十分广泛。图1所示是世界上第一台内置电池的计算机。


图1 世界上第一台内置电池的计算机

微型计算机按应用范围可以划分为专用微型机、个人计算机和超级微型机三类。

（1）专用微型机。用于处理特定算法或过程控制，其逻辑结构与软件按不同应用要求而设计。

（2）个人计算机。用于家庭或较小规模的数据、文字声音、图形图像处理的微型计算机系统。其硬件系统由较通行的主机配以硬盘、软盘及光盘驱动器，连接键盘、显示器以及打印机等常规设备构成。个人计算机装有单用户操作系统和各种实用软件，具有较好的可移植性和兼容性。一般配以网络适配器（网卡）和网络操作系统，可以方便地组成计算机网络。

（3）超级微型机。在兼容个人计算机的各种软、硬件资源的前提下，其系统能力可扩展到相当于小型机或超级小型机范围的一种高档微型机。在多任务、多用户操作系统的支持下，能完成各种相当复杂的工作任务。超级机型已采用精简指令系统的微处理器。超级微型机大多使用的是扩展标准工业结构和微通道结构两大体系。

图2为各种微型计算机。

自1971年4位微处理器问世以来，微型计算机获得了迅速发展，8位、16位、32位及64位字长的微型机相继出现，性能价格比不断提高，其中高档超级微型机已达到或超过低档小型机的性能。中国自20世纪80年代初发展国产微型机，已推出了8位、16位、32位及64位机型。



图 2　各种微型计算机

随着超大规模集成电路生产技术的进一步提高，微型计算机向着更高的处理速度、更大的存储容量、更宽的数据总线和多处理器并行处理结构发展。

weibo

韦伯　(weber)　　国际单位制（SI）中磁通量的单位。韦伯简称韦，符号是 Wb。令单匝闭合线圈中的磁通量以均匀速率在 1s 内下降到零，若该线圈在此时间内的感应电动势是 1V，则原来线圈的磁通量定义为 1Wb。

weiyi dianliu

位移电流　(displacement current)　　电通量的时间变化率。M. 法拉第（M. Faraday，1791—1867）发现随时间变化的磁场可激发电场的电磁感应定律之后，根据对偶性，提出了随时间变化的电场可以激发磁场的设想。J. C. 麦克斯韦（J. C. Maxwell，1831—1879）认为这一设想是正确的，否则将与电荷守恒定律发生矛盾。麦克斯韦据此建立了位移电流的概念，认为它和传导电流一样也可以激发磁场。穿过面 S 的位移电流 i_D 可表示为面 S 上的电通量 Ψ_D 的时间导数

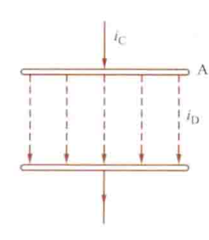
$$i_D = \frac{\partial \Psi_D}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}\int_S \boldsymbol{D} \cdot d\boldsymbol{S} = \int_S \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{S}$$

式中 $\boldsymbol{D}$ 为电通密度；t 为时间。位移电流密度 $\boldsymbol{J}_D$ 是

$$\boldsymbol{J}_D = \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial t}$$

式中 $\boldsymbol{E}$ 为电场强度；ε_0 为真空电容率；$\boldsymbol{P}$ 为介质中的极化强度。上式等号右端第一项 $\varepsilon_0 \partial \boldsymbol{E}/\partial t$ 与该处电荷无关，是由电场随时间的变化引起的；第二项 $\partial \boldsymbol{P}/\partial t$ 是由介质束缚电荷移动引起的。令传导电流为 i_C，则全电流是传导电流 i_C 与位移电流 i_D 之和，即

$$i = i_C + i_D$$



充电过程中电容器内全电流的连续性

在时变电磁场中，传导电流 i_C 可以不连续。例如电容器在充电过程中就有这种情况。如图所示，i_C 流入电容器极板 A，但无传导电流由 A 流出，传导电流不连续。但是，图中的介质内有位移电流 i_D 从 A 流出，而且 $i_D = i_C$，从而全电流是连续的。全电流连续性的积分形式为

$$\oint_S \boldsymbol{J} \cdot d\boldsymbol{S} = 0$$

其微分形式为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J} = 0$$

式中 $\boldsymbol{J}$ 为全电流密度，它等于传导电流密度 $\boldsymbol{J}_C$ 与位移电流密度 $\boldsymbol{J}_D$ 之和，即 $\boldsymbol{J} = \boldsymbol{J}_C + \boldsymbol{J}_D$。

wenmin dianzu cailiao

温敏电阻材料　(temperature sensitive resistance materials)　　电阻随温度显著变化的导电材料。可以利用这类材料的电阻温度特性来测定温度。

温敏电阻材料有金属、陶瓷、单晶半导体、温敏玻璃和温敏塑料等。铂（Pt）、镍（Ni）等金属是较早采用的温敏电阻材料，有正电阻温度系数；而硫化银（Ag_2S）是最早（1837 年）发现的负温温敏电阻材料。1940 年后，发现有很大负温度系数（NTC）的半导体温敏材料；1950 年开发了锰-钴-镍（Mn-Co-Ni）三元系材料，后来又向四元系发展；1955 年又开发了以钛酸钡（$BaTiO_3$）为主的正温度系数（PTC）温敏材料；1960 年研制出了临界负温敏电阻（CTR）材料。

金属温敏电阻材料主要是铂（Pt），其性能稳定、线性度好，工作温度为 −200～+800℃。陶瓷温敏材料，有负温度系数的锰（Mn）、钴（Co）、镍（Ni）、铁（Fe）和铜（Cu）等金属氧化物的复合烧结体，其温敏系数为 2000～6000，温度系数 −1%～−6%（$℃^{-1}$），工作温度 −60～+300℃；有正温度系数的钛酸钡（$BaTiO_3$）与钛酸锶（$SrTiO_3$）或钛酸铅（$PbTiO_3$）的结合，并加微量铌（Nb）、钽（Ta）或镧（La）、铈（Ce）等元素，其温度系数在 0.5%～60%（$℃^{-1}$）；还有临界负温电阻材料以氧化钒（V_2O_5）为主要成分，温度系数高达 −100%（$℃^{-1}$）。单晶半导体主要有锗（Ge）、硅（Si），其稳定性较好，温度系数与掺杂有关。温敏玻璃主要由氧化钒（V_2O_5）、氧化钨（WO_3）和五氧化二磷（P_2O_5）制成，其稳定性较差，故使用不多。温敏塑料采用聚乙烯和温敏有机半导体（多环芳香族化合物和聚酰胺树脂等）制造，富有柔性，适于大面积平均温度检测，但使用温度不高。温敏电阻材料用于制作测温元器件、热敏器件和温度传感器。

铂测温电阻器（丝或膜式）0℃时的阻值有 50Ω 或 100Ω，其准确度达 ±0.1℃，非线性误差 ±0.5℃，适于精密测量。使用时应消除连接导线电阻的影响。陶瓷温敏电阻种类繁多，NTC、PTC 和 CTR 三类的特性见表。使用中须注意不同场合选取合适的电阻器型号；注意测温电阻的安置方法、适用的温度范围、容许误差和响应时间等。单晶半导体温敏电阻主要有锗电阻器，用于精密测量、控温和低温（1.5～40K）测量。

温敏电阻的测温准确度优于热电偶，并具有互换性。发

陶瓷温敏电阻的种类、特性和主要用途

名称	0℃时的阻值 (Ω)	电阻温度系数 ($℃^{-1}$)	热时间常数 (s)	主要用途
NTC	10～10M	−1%～−6%	0.5～3	测温、控温、温度补偿、温度报警、微波功率测量、稳压、流量和流速测量、延时等
PTC	10～1M	6%～50%	3～10	测温、控温、温度补偿、报警、过载保护、延时和加热等
CTR	1k～10M	−30%～−100%	0.5～3	特定温度检测、控温、温度报警和直接加热延时等

展趋势是：寻求灵敏度高、工艺性好和高稳定性的材料；发展超低温（—200℃以下）和稳定的高温（300℃以上）测量材料；研制和发展温度系数较大的线性温敏电阻材料及其他类型的新型材料，如温敏塑料。

wendang

文档 (document) 用自然语言、半形式化语言或形式化语言编写，描述软件开发、维护和使用过程的档案资料和对软件本身的阐明性资料。作为计算机软件的重要组成部分，是软件开发、使用和维护中的必备资料。文档将“不可见”的软件开发过程转换成“可见”的文字资料，便于开发人员之间的交流和项目管理，帮助用户尽快熟悉软件特性，掌握软件使用方法，在开发人员、项目管理人员、维护人员、用户和计算机系统之间起着桥梁作用。中国国家标准化委员会2006年颁布了《计算机软件文档编制规范》（GB/T 8567—2006）作为软件文档编制规范，将软件文档分为开发文档、用户文档和管理文档。

（1）开发文档：面向开发人员，描述软件开发过程的技术资料，包括可行性研究报告、项目开发计划、软件需求说明书、数据要求说明书、概要设计说明书、详细设计说明书、测试计划、测试分析报告。

（2）用户文档：面向用户，描述软件使用方式的资料，包括用户手册、操作手册。

（3）管理文档：描述软件开发计划实施进展的资料，便于管理人员各阶段检查开发计划的实施进展，保证软件开发顺利进行。包括项目开发计划、模块开发卷宗、开发进度月报、项目开发总结报告。

wenjian

文件 (file) 由若干个逻辑记录构成的数据集合。它是一种数据结构。记录文件的读写基本单元是一个记录。记录是由一个或多个数据项组成的集合，数据项是最基本的不可分的数据单位，也是用户可能加工的最小数据单位。例如电工产品文件由若干个电工产品的记录组成，每一记录包含产品编号、名称、规格型号等数据项。此外，还有一种无结构的数据序列，称为流式文件。最常见的是字符流文件，若将一个字符看作一个记录，则字符流文件也是一种特殊的记录文件。

文件和数组不同，它的大小在逻辑上可以是无限的。记录在文件中的排列可能有顺序关系，除此以外，记录之间不存在其他关系，在这一点上它不同于数据库。

根据文件中记录的组织方式可把文件分为顺序文件、索引文件和直接文件三类。

顺序文件　文件中记录与记录之间存在一种逻辑上的顺序关系，并且文件各记录在存储介质的物理排列顺序与逻辑顺序一致。按记录的序号或记录的相对位置存取记录是这类文件的主要使用方式。

索引文件　文件中记录与记录之间也存在着一种逻辑上的顺序关系，但记录之间的物理顺序和逻辑顺序不一致，在文件（主文件）之外，再建立一张指示逻辑记录与物理记录之间一一对应关系的索引表，利用索引表上的顺序关系来表示相应记录之间逻辑上的顺序。这类包含主文件和索引表两大部分的文件称为索引文件。如在索引文件中，主文件内各记录的物理顺序和逻辑顺序也是一致的，则称为索引顺序文件。当索引文件中记录的数目很大时，为了提高查阅索引的效率，可以对索引表再建立一个索引，从而形成多层索引文件。

直接文件　在这一类文件中，记录之间逻辑上没有顺序关系，为了存取某一记录，可使用某种算法（常用的是散列算法），根据记录的标识信息直接计算出该记录的存储地址。

在实际工作中，又将文件分为系统文件（计算机系统本身拥有的文件）和用户文件（各用户自己建立的文件）两类。

为了便于文件的管理和应用，每一文件都有一个名字，称为文件名。文件的名字及其属性可以收集在目录中，以便于查找。而目录本身也是一种文件（目录文件），因此也可为它们编制目录，从而构成各种层次结构的文件系统。

对文件的操作主要有检索和修改两类。对记录文件的检索可分为四种：简单检索、区域检索、函数检索和布尔检索。①简单检索：查询某一数据项具有给定值的记录；②区域检索：查询某一数据项的值属于给定区域内的记录；③函数检索：先给定文件中的一个数据项的某个函数，然后对该函数的某个值进行查询；④布尔检索：以上三种检索用布尔运算组合起来的查询。文件的修改包括插入一个记录、删除一个记录和更新记录等操作。对字符流文件的操作，通常是按字符、字符串、行、页等为单位进行的。对文件的操作有实时和批量两种不同处理方式。

wentai fenliang

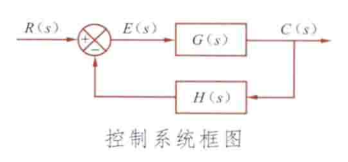
稳态分量 (steady state component) 周期性激励作用于有损、线性、非时变的动态电路时，电路中所出现的与激励同周期的响应。当电路中的暂态分量衰减到可以忽略，响应仅为稳态分量时，称电路处于稳态。

若激励是恒定的（相当于周期是无穷长，即直流激励），稳态响应也是恒定的，可用解直流电路方法求稳态分量。若激励的波形是正弦波形，稳态响应的波形也是与激励同周期的正弦波，可用相量法求稳态分量。

wentai wucha

稳态误差 (steady state error) 自动控制系统在稳态下的控制精度的度量。控制系统在过渡过程结束后进入稳态。稳态误差越小表明控制精度越高。控制系统设计，要在兼顾其他性能指标的情况下，使稳态误差尽可能小或小于容许的限制值。

稳态误差按产生的原因分类，有原理性误差和实际性误差。原理性误差是控制系统在原理上必然存在的一类稳态误差。原理性稳态误差为零的控制系统称为无静差系统，否则称为有静差系统。原理性稳态误差能否消除，取决于系统的组成中是否包含积分环节。实际性误差是系统的组成部件中的不完善因素（如摩擦、间隙、不灵敏区等）所造成的稳态误差。这种误差不可能完全消除，只能设法使之减小。



控制系统框图

原理性稳态误差分析如下。

如上图所示的系统，其闭环传递函数为 $C(s)/R(s)=\frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$，同时，有 $E(s)=\frac{1}{1+G(s)H(s)}R(s)$，由拉普拉斯变换的终值定理，得稳态误差为

$$e_{ss}=\lim_{t\to\infty}e(t)=\lim_{s\to 0}sE(s)=\lim_{s\to 0}\frac{sR(s)}{1+G(s)H(s)}$$

当系统的输入为单位阶跃输入 $r(t)=\begin{cases}1, t\geqslant 0\\0, t<0\end{cases}$ 时，$R(s)=1/s$，$e_{ss}=\lim_{s\to 0}\frac{s}{1+G(s)H(s)}\times\frac{1}{s}=\frac{1}{1+G(0)H(0)}\overset{\text{def}}{=\!=}\frac{1}{1+K_P}$，稳态位置误差系数 $K_P\overset{\text{def}}{=}\lim_{s\to 0}G(s)H(s)=G(0)H(0)$。

当系统的输入为单位斜坡输入（单位速度输入）$r(t)=\begin{cases}t, t\geqslant 0\\0, t<0\end{cases}$ 时，$R(s)=1/s^2$，$e_{ss}=\lim_{s\to 0}\frac{s}{1+G(s)H(s)}\times\frac{1}{s^2}=\lim_{s\to 0}\frac{1}{sG(s)H(s)}\overset{\text{def}}{=\!=}\frac{1}{K_V}$，稳态速度误差系数 $K_V\overset{\text{def}}{=}\lim_{s\to 0}sG(s)H(s)$。

当系统的输入为单位抛物线输入（单位加速度输入）$r(t)=\begin{cases}t^2/2, t\geqslant 0\\0, t<0\end{cases}$ 时，$R(s)=1/s^3$，$e_{ss}=\lim_{s\to 0}\frac{s}{1+G(s)H(s)}\times\frac{1}{s^3}=\lim_{s\to 0}\frac{1}{s^2G(s)H(s)}\overset{\text{def}}{=}\frac{1}{K_a}$，稳态加速度误差系数 $K_a\overset{\text{def}}{=}\lim_{s\to 0}s^2G(s)H(s)$。

分析研究控制系统中的稳态误差，用到控制系统的“型”的概念。控制系统的开环传递函数可表示为

$$G(s)H(s)=\frac{K(T_as+1)(T_bs+1)\cdots(T_ms+1)}{s^{\lambda}(T_1s+1)(T_2s+1)\cdots(T_Ps+1)}$$

在分母中包含的项 s^{λ}，表示在原点处有 λ 重极点。$\lambda=0$，$\lambda=1$、$\lambda=2$，…时，系统分别称为 0 型、1 型、2 型、…，依次对应于没有积分环节、有一个积分环节、有两个积分环节、…。3 型和高于 3 型的系统实际上是极少的。K 是开环增益。0 型系统不能跟踪斜坡输入，0 型和 1 型系统不能跟踪抛物线输入，这些情况下稳态误差都是无穷大。

稳态误差及稳态误差系数见下表。

稳态误差及稳态误差系数

系统类型	单位阶跃输入		单位斜坡输入		单位抛物线输入	
	K_p	$e=\frac{1}{1+K_P}$	K_V	$e=\frac{1}{K_V}$	K_a	$e=\frac{1}{K_a}$
0	K	$\frac{1}{1+K}$	0	∞	0	∞
1	∞	0	K	$\frac{1}{K}$	0	∞
2	∞	0	∞	0	K	$\frac{1}{K}$
3 及 3 以上	∞	0	∞	0	∞	0

wenya dianlu

稳压电路 (voltage stabilizing circuit)

当输入电压、环境温度、元件参数以及负载等发生变化时，能维持直流输出电压值近于恒定的电子电路。电力系统中广泛使用的电子仪器以及某些用电设备所需的稳定直流电源，大部分都是经过稳压电路供给的。

稳压电路的框图如图所示，其输入的未稳直流电源通常由交流电通过整流滤波电路而取得。由于稳压电路本身具有滤波作用，因而未稳直流电源中所用的滤波电路一般采用比较简单的纯电容型滤波电路。未稳直流电源通过稳压电路后，形成一个恒压源供给负载。



稳压电路的框图

稳压电路中调整管工作于线性放大区的称为线性稳压电路；调整管处于开关工作状态的称为开关稳压电路。线性稳压电路又可分为硅稳压管稳压电路、串联稳压电路和集成稳压块。

整个稳压电路是一个闭环的反馈系统（见反馈放大电路），其输出电压的微变量 dU_L 与输入电压 U_I、负载电流 I_L、环境温度 T 等微变量之间的关系为

$$dU_L=\frac{\partial U_L}{\partial U_I}dU_I+\frac{\partial U_L}{\partial I_L}dI_L+\frac{\partial U_L}{\partial T}dT$$

式中 $\frac{\partial U_L}{\partial U_I}$ 为电压调整率 S_u；$\frac{\partial U_L}{\partial I_L}$ 为输出电阻 r_o；$\frac{\partial U_L}{\partial T}$ 为温度系数 S_T。它们是稳压电路的三个主要性能指标，其值越小越好。此外，稳压电路还有一些其他性能指标，如输出端的最大纹波电压、噪声电压、输出电压长期稳定性等。

woliu

涡流 (eddy current)

变化磁场在导体中产生的感应电流。导体静止而磁场变化或导体在磁场中运动均可产生涡流。电机、变压器运行时，磁路中存在着变化磁场，因此将在导电导磁材料中产生涡流。涡流导致电能损耗（见涡流损耗），这种损耗以焦耳热的形式释放，从而导致电气设备温度升高。

涡流引起的温升可用于加热。由于涡流产生的热量来自导体内部，加热效率高，被加热物体的氧化损失少，因此感应加热的方法广泛应用于冶金工业，特别适用于难熔金属或易氧化金属。此外，当需要加热的导电零件被绝热物质包围时，感应加热是一种可行的方法。电真空器件加热除气即是典型例子。

涡流可用来使运动物体产生阻尼。指针式仪表中为了防止指针在测量中摆动不止，难以读数，便将线圈绕在铝框上，摆动时铝框内产生涡流，依照楞次定律，其结果必然是阻止摆动。

涡流还广泛用于金属材料的无损检测。位于变化磁场中的金属材料，由于金属自身各种因素（形状、尺寸、缺陷、电导率、磁导率等）的变化，会导致材料外部电磁场的变化，通过检测材料外部电磁场的变化就可以判断金属材料的参数和缺陷。

woliu sunhao

涡流损耗 (eddy current loss)

由涡流引起的能量损失。导体静止而磁场变化或导体在磁场中运动均可在导体中引起涡流。是电机、变压器等电气设备中铁芯损耗的两个主要组成部分之一（另一部分为磁滞损耗）。涡流损耗的危害：①损失了能量，降低了电气设备的效率；②导致电气设备温升。为了不超过额定温升，必须增大体积或采用冷却措施。因此电气设备设计中应尽量减少涡流损耗。

交变磁场在铁芯中引起的涡流损耗取决于许多因素，主要有交变磁场的频率 f，最大磁通密度 B_m，铁芯的电阻率 ρ 及形状、尺寸等。此外，还与磁通的波形，磁通在铁芯截面上的分布等因素有关。在使用硅钢片叠合铁芯时，单位时间、单位体积内的涡流损耗 W_e 可按下式估算：$W_e=Kf^2d^2B_m^2/\rho$，式中常数 K 的选择取决于 f、d、B_m 及 ρ 以外的因素，可根据经验，或试探性地选取，d 是硅钢片的厚度。

由上述公式可以看出应如何减少涡流损耗。还可看出，在感应加热的情况下，为了增加涡流产生的热量，最主要的手段应是提高工作频率。

wucixing gangtie cailiao

无磁性钢铁材料 （non-magnetic steel materials）

常温下不呈现磁性的钢铁材料。在某些仪表及有特殊要求的元器件中，需要机械强度大而无磁性的钢铁材料，例如各种电子透镜的电极材料应无磁性。铁磁体在居里温度以上失去磁性。因此选用居里点在室温以下的铁磁材料，在室温以上使用时均无磁性。

常用的无磁性钢铁合金有不锈钢、Nomag 合金、Nimal 合金、Niresist 合金、锰钢等。

（1）不锈钢：含 Ni 18%、Cr 8%，其余为 Fe。

（2）Nomag 合金：含 Ni 9%～12%、Mn 5%～7%、Si 2%～2.5%、C 2.5%～3%，其余为 Fe。

（3）Nimal 合金：含 Ni 12%～14%、Cr 2%～4%、Cu 6%～8%、Mn 0.4%～0.6%、Si 1.5%～2%、C 2.7%～3%，其余为 Fe。

（4）Niresist 合金：含 Ni 12%～15%、Cr 1.5%～4%、Cu 5%～7%、Mn 1%～1.5%、Si 1.2%～2%、C 2.7%～8%，其余为 Fe。

（5）锰钢：含 Mn 12%～14%、C 1%～1.2%，其余为 Fe。

此外，铁的奥氏体也是无磁性材料。

wugong diannengbiao

无功电能表 （var-hour meter）

测量交流电路中无功电能的电表，分为感应系无功电能表和静止式无功电能表。

感应系无功电能表 基本结构与感应系电能表相同。三相无功电能表按测量机构的内相角（$\alpha_U-\alpha_I$）分为 180°、90°及 60°三类。α_U 为电压工作磁通 $\underline{\Phi}_U$ 滞后于 $\underline{U}$ 的相位角；α_I 为电流工作磁通 $\underline{\Phi}_I$ 滞后于 $\underline{I}$ 的相位角。

180°无功电能表 这种表的性能较差，功耗大，结构较复杂，很少使用。

90°无功电能表 适用于简单不平衡线路，此时，三相线电压 $U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=U=\sqrt{3}\,U_{ph}$，$U_{ph}$ 为相电压。对于三元件结构，按表中的接线方式，无功电能表的转矩取决于（$UI_A\sin\varphi_A+UI_B\sin\varphi_B+UI_C\sin\varphi_C$），其中 I_A、I_B、I_C 分别为三条线中的电流；φ_A、φ_B、φ_C 为三相的功率因数角。对于两元件结构，按表中的接线方式（两电流元件的电流分别为 $\underline{I}_A-\underline{I}_B$ 及 $\underline{I}_C-\underline{I}_B$），无功电能表的转矩取决于 $\sqrt{3}$（$U_{ph}\times I_A\sin\varphi_A+U_{ph}I_B\sin\varphi_B+U_{ph}I_C\sin\varphi_C$）。可见对上述两种情况，无功电能表的转矩都与三相总无功功率成正比，但均为实际值的 $\sqrt{3}$ 倍，这可通过改变电表常数予以修正。

60°无功电能表 在感应系电能表的电压线圈支路串入电阻，并加大电压非工作磁通的磁阻，使 $\alpha_U-\alpha_I=60°$。对简单不平衡三相线路，不论是两元件结构还是三元件结构，如按表中所列接线方式，感应系无功电能表的转矩都取决于 $U_{ph}I_A\sin\varphi_A+U_{ph}I_B\sin\varphi_B+U_{ph}I_C\sin\varphi_C$，也就是感应系无功电能表的转矩与三相无功功率成正比，即能正确记录三相总无功电能。

感应系三相无功电能表的接线方式

内相角	电网条件	线路形式	接线图
90°	简单不平衡三相线路，正相序	三线	A B
		四线	C N
		三线	A B
		四线	C N
60°		三线	A B C
		四线	A B C N

三相无功电能表的准确级别为 3 级、2 级和 1 级。使用时应注意相序的正确性。在完全不平衡三相（即线电压可不对称，线电流也可不对称）线路中，90°及 60°三相无功电能表均有较大测量误差。（见无功功率测量）

静止式无功电能表 除基于上述公式实现对测得信号的无功功率、无功电能的计算外，在被测信号获取和模数转换，计量结果的存储、管理及输出等功能的实现上，静止式无功电能表与静止式电能表相同。

wugong gonglü

无功功率 （reactive power）

电力系统中表述视在功率超过有功功率程度的辅助量。它具有功率的量纲，单位名称为乏（符号 var）。无功功率 Q 常作为衡量视在功率 S 超过有功功率 P 的指标之一。对于消耗相同有功功率 P 的负载，负载所需要的无功功率 Q 越大，则要求电源设备的容量（由视在功率 S 代表）越大。而且电网中有无功功率流动时，会引起电压损失，并且使线路损耗增大。负载本身所需要的无功功率本来是由电源提供的，但是可以在负载侧装设补偿负载无功功率的设备以减少负载侧对无功功率的需求，从而降低电源设备容量和线路损耗，这种技术措施叫做无功补偿。

常见的无功功率定义有三种：①电压、电流的波形是同频率正弦波时的无功功率；②电压、电流的波形是同周期非正弦波时按谐波（频域）分析的无功功率；③电压、电流的波形是同周期非正弦波时按波形（时域）分析的无功功率。

电压、电流的波形是同频率正弦波时的无功功率 设 U 和 I 分别是二端电路电压和电流的有效值，φ 是电流滞后于电压的相位差角，则无功功率 Q 定义为 $Q=UI\sin\varphi$。相应地，有功功率 $P=UI\cos\varphi$，视在功率 $S=\sqrt{P^2+Q^2}$。若称 $I\sin\varphi$ 为电流 I 的无功分量 I_q，则无功功率又可定义为电压 U 和电流的无功分量 I_q 的乘积。若二端电路是电感性电路，二端电路除了从电源获得有功功率 P 以外，还有一部分能量在电路和电源之间不断地交换，此时 $P>0$，$Q>0$。假如二端电路是纯电感电路，此时 $P=0$，$Q>0$，电感不消耗有功功率，只有能量交换；无功功率 Q 值是能量交换的最大速率，也是瞬时功率的最大值。

习惯上，规定电感性负载吸收的无功功率 Q_L 为正

$(Q_L>0)$，电容性负载吸收的无功功率Q_C为负$(Q_C<0)$，这与令φ为电流滞后于电压的相位差角的规定一致。一般的电力负载多为电感性的，若用电容与负载并联，则负载侧吸收的总无功功率$Q'=Q_L+Q_C<Q_L$，即负载侧的无功功率部分地由电容的无功功率Q_C补偿，由补偿前的Q_L降低到补偿后的Q'。

电压、电流的波形是同周期非正弦波时按谐波（频域）分析的无功功率　将二端电路的电压和电流的非正弦周期波形分别分解成傅里叶级数，设U_n和I_n分别是第n次谐波电压和电流的有效值，φ_n是第n次谐波电流滞后于第n次谐波电压的相位差角，则由上一定义引申，第n次谐波的无功功率$Q_n=U_nI_n\sin\varphi_n$。此时定义无功功率等于基波和各次谐波的无功功率之和，将基波当作第一次谐波看待，则无功功率$Q=\sum_{n=1,2,\cdots}U_nI_n\sin\varphi_n$。虽然至今尚没有满意的测量它的方法和仪表，但此定义仍被广泛使用。按照这个定义，$S^2\neq P^2+Q^2$。（见畸变功率）

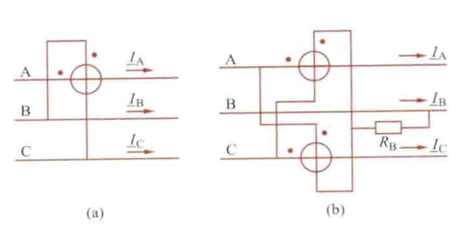
电压、电流的波形是同周期非正弦波时按波形（时域）分析的无功功率　首先从电流$i(t)$分解出有功电流$i_p(t)$，$i_p(t)$的波形与电压$u(t)$的波形一致，即$i_p(t)\propto u(t)$，而且$i_p(t)$与$u(t)$产生的有功功率等于$i(t)$与$u(t)$产生的有功功率。电流$i(t)$的其余部分称为无功电流$i_q(t)$，即$i_q(t)=i(t)-i_p(t)$。若令U、I、I_p和I_q分别为电压、电流、有功电流和无功电流的有效值，则无功功率等于电压有效值和无功电流有效值的乘积，即$Q=UI_q$，并有$I^2=I_p^2+I_q^2$及$S^2=P^2+Q^2$。当电压、电流是正弦波形时，这里定义的无功电流I_q、无功功率Q和第一个定义里的一致。通常根据时域分析的无功补偿方法是，由静止无功补偿电源向负载注入无功电流$i_q(t)$，则电源只需向负载提供有功电流$i_p(t)$。

wugong gonglübiao

无功功率表　(varmeter)

测量交流无功功率量值的电表。

无功功率是正弦稳态条件下电压、电流有效值及两者相位差角正弦的乘积。将被测正弦电压移相90°，再接至电动系功率表测量机构的电压回路，即可测量无功功率。在电力系统中常利用对称三相电压、电流间相位差角为120°的关系，在不同相间进行跨接线来实现90°相位移，如图(a)所示。利用此种接法，即可采用常规的有功功率表来测量对称三相系统的无功功率。功率表的示值是A相无功功率的$\sqrt{3}$倍，再乘$\sqrt{3}$即等于三相的无功功率。对简单不对称（即线电压对称，但线电流可不对称）三相系统，则每相均需接一块功率表，都采用90°跨接线法。三块功率表示值之和除以$\sqrt{3}$，即为三相的无功功率。对简单不对称三相三线系统，也常采用两块功率表，按图(b)的接线测量三相无功功率。图(b)中，R_B的值应与功率表电压支路的内阻值相等。三相无功功率值为两表示值之和的$\sqrt{3}$倍。实际的三相无功功率表是在一个表壳内装设两个或三个测量机构，标度已计入$\sqrt{3}$倍的关系，故由表盘可直接读取三相的无功功率值。



测量无功功率的接线图

(a) 跨相90°接法；(b) 两功率表法

无功功率表的量程可达数百乏至数千乏，再附加测量互感器，可达数百兆乏。电动系无功功率表的频率范围从数十赫到几千赫。实用无功功率表的最高准确级优于0.2级。配电盘用无功功率表的准确级一般较低。

无功功率表受谐波影响大，只可在电压和电流波形实际上均为正弦的线路中使用。

wugong gonglü celiang

无功功率测量　(reactive power measurement)

单位时间内交流电路无功电能量值的测量。无功功率的单位为乏(var)。可使用无功功率表直接测量无功功率。

见无功功率表。

wuji guti jueyuan cailiao

无机固体绝缘材料　(inorganic solid insulating materials)

用于电气绝缘的固体无机材料。主要包括电瓷、玻璃和云母等。最早的无机固体绝缘材料的组成主要是硅酸盐，近几十年来，随着科学技术的发展，无机固体绝缘材料有了很大发展，除了传统的硅酸盐材料外，许多纯氧化物、复合氧化物、氮化物、硼化物等也成为无机绝缘材料。应用范围也由电力系统扩展到其他领域。

无机固体绝缘材料多由兼有离子键和共价键的物质构成，因此它们的一般特性是质地脆、硬度大、抗压强度高、耐高温、抗氧化、抗化学腐蚀性能以及电气绝缘性能良好，在电气绝缘技术中，特别是在户外绝缘、高温绝缘和严酷条件绝缘中获得广泛的应用。

无机固体绝缘材料按其聚集状态和结构，可分为单晶、多晶、非晶态以及它们的许多复合体系。在应用上，除一般固体块状材料外，还发展了诸如纤维、薄膜和涂层等特殊外形的材料。无机固体绝缘材料除可单独使用外，常与有机高分子材料复合，取长补短，制成性能优良的复合材料。

wuxian chuanganqi wangluo

无线传感器网络　(wireless sensor network, WSN)

综合了微电子、嵌入式计算、现代网络及无线通信、分布式信息处理等先进技术，能够协同地实时监测、感知和采集网络覆盖区域中各种环境或监测对象的信息，并对其进行处理及通过无线方式发送给观察者的网络。

组成与结构　由分布式传感器节点、接收器和发送器、互联网以及用户接口界面等组成。其中传感器节点是基本和核心单元，它包括传感单元、处理单元、通信单元和电源等。无线传感器网络一般采用分层体系结构，由物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层组成，其中物理层除了采用传统的红外线传输技术，也可采用无线射频传输技术，有正交频分复用、超宽带、多输入多输出，甚至码分多址技术等。

应用　无线传感器网络是一种信息获取平台，能够实时监测和采集网络分布区域内的各种检测对象的信息，并将这

些信息发送到网关节点，以实现复杂的指定范围内目标检测与跟踪，具有快速展开、抗毁性强等特点，有着广阔的应用前景，可应用在军事、航空、反恐、防爆、救灾、环境、医疗、保健、家居、工业、商业等领域。

wuyuan erduan yuanjian

无源二端元件 (passive two-terminal elements) 具有两个端子且又是无源的电路元件。通常指电阻、电容和电感。

电阻 消耗电能的电路元件。电阻元件的图形符号如图1所示。其元件特性用元件两端的电压与其电流的关系来表示，这种特性也称为伏安特性。电阻值 $R>0$ 的电阻的消耗功率可表示为 $p=ui$，恒大于或等于零，因此电阻是一耗能无源元件。

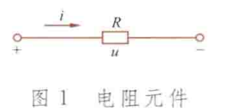


图1 电阻元件图形符号

根据伏安特性是否呈线性，电阻可分为线性电阻和非线性电阻；根据伏安特性是否随时间变化，电阻又可分为时变电阻和非时变电阻。

(1) 线性非时变电阻。在图1所示的电压、电流参考方向下，线性非时变电阻的伏安特性是一条在 u、i 平面上通过坐标原点，且处于一、三象限内的直线（见图2）。线性二端非时变电阻满足欧姆定律，可表示为

$$u=Ri$$

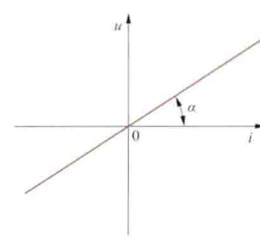


图2 线性二端非时变电阻的伏安特性

式中 R 是电阻参数，为一正值常数，它正比于伏安特性的斜率，即 $R\propto\tan\alpha$。线性电阻的功率可进一步表示为 $p=ui=Ri^2=u^2/R$。

(2) 非线性非时变电阻。在图1所示的电压、电流参考方向下，它的伏安特性是在 u、i 平面上通过坐标原点且处于一、三象限内的曲线（非直线），可表示为 $f(u,\ i)\ =0$。图3所示为避雷器的伏安特性曲线。从电路元件的角度看避雷器是一非线性非时变的二端电阻。对于非线性电阻有时引用静态电阻 R 和动态电阻 R_d 的概念，它们分别定义为

$$R\overset{\text{def}}{=}\frac{u}{i},\ R_d\overset{\text{def}}{=}\frac{du}{di}$$

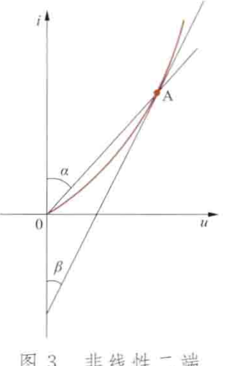


图3 非线性二端电阻的伏安特性

显然，静态电阻 R 和动态电阻 R_d 一般都是电压 u 或电流 i 的函数。在图3中，A点的静态电阻正比于该点至原点直线 $(\overline{0A})$ 的斜率，即 $R\propto\tan\alpha$。A点的动态电阻正比于伏安特性在该点切线的斜率，即 $R\propto\tan\beta$。

(3) 线性时变电阻。图4表示一线性二端时变电阻的伏安特性。其伏安特性是在 u、i 平面上通过原点且处于一、三象限内，其斜率随时间变化的无数条直线。每一条直线对应于某一时刻 t。线性二端时变电阻也满足欧姆定律，可表示为

$$u=R(t)i$$

但此时，电阻参数 $R(t)$ 是某一时间的函数。受调节的电位器，它的电阻值随时间变化，就是一个线性时变电阻。

(4) 非线性时变电阻：其伏安特性呈非线性且随时间变化，一般可表示为

$$f(u,\ i,\ t)\ =0$$

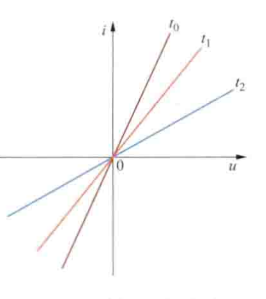


图4 线性二端时变电阻的伏安特性

电容 储存电场能量的电路元件。电容元件的图形符号如图5所示。其元件特性用元件两端的电荷与其电压的关系来表示，这种特性又称为库伏特性。根据库伏特性是否呈线性，电容可分为线性电容和非线性电容；根据库伏特性是否随时间变化，电容又可分为非时变电容和时变电容。库伏特性曲线在 q、u 平面上通过原点，且位于一、三象限内曲线斜率不为负的非时变电容是无源元件。

图5 电容元件的图形符号

(1) 线性非时变电容。在图5所示的电荷、电压参考方向下，线性二端非时变电容的库伏特性是一条在 q、u 平面上通过坐标原点，且处于一、三象限内的直线（见图6），即电荷和电压呈正比关系，可表示为

$$q=Cu$$

式中 C 是电容参数，为一正值常数，它正比于库伏特性的斜率，即 $C\propto\tan\alpha$。该元件的电压、电流关系为

图6 线性二端非时变电容的库伏特性

$$i=C\frac{du}{dt}$$

$$u=u(0)+\frac{1}{C}\int_0^t i\,dt,t\geqslant 0$$

式中 $u(0)$ 是电容的初始电压即 $t=0$ 时刻的电压。

线性非时变电容不消耗能量，它是储能元件，它储存的电场能量 W_C 为

$$W_C=\frac{1}{2}Cu^2$$

线性非时变电容在电路中可用作为滤波、谐振、能量转换等功率处理器件使用。电力系统中常采用它来改善电网的功率因数。

(2) 非线性非时变电容。其库伏特性可表示为 $f(q,\ u)=0$。图7表示某一非线性非时变电容的库伏特性。

图7 非线性非时变电容的库伏特性

非线性非时变电容可用于分频、参量放大、电子调谐等电路。

电感 储存磁场能量的电路元件。电感元件的图形符号如图8所示。其元件特性用元件的磁链与其电流的关系来表示，这种特性称为韦安特性。根据韦安特性是否呈线性，电感可分为线性电感和非线性电感；根据韦安特性是否随时间变化，电感又可分为非时变电感和时变电感。韦安特性曲线在 Ψ、i 平面上通过坐标原点，且位于一、三象限内曲线斜

图 8　电感元件的图形符号

率不为负的非时变电感是无源元件。

（1）线性非时变电感。在磁链和电流的参考方向为右手螺旋关系时，线性二端非时变电感的韦安特性是一条在 Ψ、i 平面上通过坐标原点，且处于一、三象限的直线（见图 9），即磁链和电流呈正比关系，可表示为

$$\Psi = Li$$

式中 L 是电感参数，为一正值常数，它正比于韦安特性的斜率，即 $L \propto \tan\alpha$。该元件的电压、电流关系为

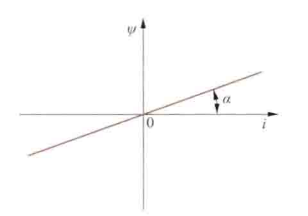


图 9　线性二端非时变电感的韦安特性

$$u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

$$i = i(0) + \frac{1}{L}\int_0^t u\,\mathrm{d}t, t \geqslant 0$$

式中 $i(0)$ 是电感的初始电流即 $t=0$ 时刻的电流。

线性非时变电感不消耗能量，是一储能元件，它储存的磁场能量等于

$$W_L = \frac{1}{2}Li^2$$

线性非时变电感在电路中可用作为滤波、谐振、能量转换等功率处理器件使用。电力系统中也常采用它来限制短路电流。

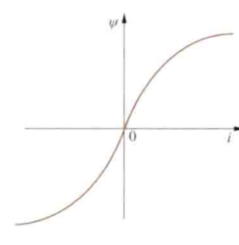


图 10　非线性非时变电感的韦安特性

（2）非线性非时变电感。图 10 所示一非线性非时变电感的韦安特性。电力设备中如变压器绕组线圈、电机绕组等都是含铁芯线圈，如果忽略铁芯中的功率损失，它们都可视为非线性非时变电感。由于磁饱和现象，它们都有类似图 10 所示的特性。

wulianwang

物联网　（the internet of things）　把传感器装备到各种物体上，通过互联网连接起来，进行信息交换和通信，以实现物体识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。它将新一代 IT 技术充分运用在各行各业之中，即把感应器嵌入和装备到电网、铁路、桥梁等各种物体上，通过接口与无线网络连接起来，进而运行特定的程序，达到远程控制或者实现物与物的直接通信，见图。物联网按其提供服务范围分为私有、公有、社区和混合物联网等。

私有物联网　一般面向单一机构内部提供服务。可能由机构或其委托的第三方实施和维护，主要存在于机构内部（on premise）内网（intranet）中，也可存在于机构外部（off premise）。



物联网示意图

公有物联网　基于互联网（internet）向公众或大型用户群体提供服务，一般由机构（或其委托的第三方，少数情况）运维。

社区物联网　向一个关联的“社区”或机构群体（如一个城市政府下属的各委办局：公安部门、交通部门、环保部门、城管部门等）提供服务。可能由两个或以上的机构协同运维，主要存在于内网和专网（Extranet/VPN）中。

混合物联网　是上述的两种或以上的物联网的组合，但后台有统一运维实体。

在物联网应用中，涉及传感器技术、嵌入式系统技术等关键技术，它将现实世界数字化，应用范围十分广泛，其应用领域主要包括以下几个方面：运输和物流领域、健康医疗领域、智能环境（家庭、办公、工厂）领域、个人和社会领域等。

参考书目

胡铮．物联网．北京：科学出版社，2010．



x-y jiluyi

x-y 记录仪 (x-y recorder) 使记录笔沿相互正交的两个方向移动的记录仪表。它可在直角坐标系中自动描绘两个电学量之间的函数关系，即$y=f(x)$。若采用多个通道，它可同时描绘几个因变量与自变量之间的函数关系，以便于互相比对和分析。

由于采用计算机化的虚拟仪器等可十分容易地表征两个变量之间的函数关系，故 x-y 记录仪在实际中已很少使用。

Xilin dianqiao

西林电桥 (Schering bridge) 见交流电桥。

ximenzi

西门子 (siemens) 国际单位制（SI）中电导、电纳、导纳等量的单位。西门子简称西，符号是 S。当导线中不存在电动势，在导线的两点即两个等位面之间加 1V 恒定电压时，可产生 1A 恒定电流，则此两点之间导线的电导定义为 1S。

xitong jiegou bianshi

系统结构辨识 (system structure identification)

在动态系统辨识中，应先正确地辨识系统模型的结构，然后才能进行参数或状态估计。对于单输入单输出系统，模型的结构就是指模型的阶次。线性系统模型结构的辨识，特别是线性稳定系统的模型结构辨识方法比较成熟，应用也比较广泛。非线性系统模型结构的辨识还处在研究中。多变量线性系统与单变量线性系统在结构辨识上有很大的不同，因为多变量系统的模型结构的参数是一组结构不变量（克罗内克不变量），为了确定这组不变量就要用比较复杂的算法。

20 世纪 60 年代，瑞典学者 K. J. Åström 提出了单输入单输出稳定线性系统结构辨识（定阶）的 F 检验法。20 世纪 60 年代末和 70 年代中，日本学者 Akaike 提出了辨识线性系统模型阶的 FPE 准则法和 AIC 准则法。现有的定阶方法比较多，主要有：F 检验法，残差平方和法，基于系统脉冲响应序列的汉格尔（Hankel）矩阵法，积矩矩阵法，残差特性法，信息准则法等。现介绍其中两种。

F 检验法　一种统计检验方法。它包括两个内容：模型的显著性检验和模型系数的显著性检验。后来变成逐步回归分析方法，是一种迭代的算法，有现成的标准程序，便于应用。

残差平方和法　一种简单的、但行之有效的模型阶次判定方法。对于被辨识系统的输入输出观测数据，用不同阶次的模型进行最小二乘拟合，然后比较不同阶次的模型与观测数据之间拟合的好坏程度（优良度）。衡量拟合的优良度的尺度是残差平方和函数 J

$$J = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e} = (\boldsymbol{y} - \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\theta}})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y} - \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\theta}})$$

式中 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 是在某一定的模型阶次下，由某种参数估计方法所获得的参数估计值；$\boldsymbol{e}$ 就是在模型参数为 $\hat{\theta}$ 时的残差；J 代表残差平方和；$\boldsymbol{y}$ 是由系统输出数据构成的矢量；$\boldsymbol{\Phi}$ 是由系统输入输出数据构成的矩阵。

根据残差平方和判定模型阶次的步骤是：①应用某种参数估计方法，求出不同的模型阶次 $n=1, 2, \cdots$，下的模型参数的估计值 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \cdots$。②计算各参数估计值 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \cdots$，的残差平方和值 $J_1, J_2, \cdots$。③做出残差平方和 J 与模型阶次 n 的关系图，随阶次数 n 增加，J 值下降，直轴由显著下降转为 J 不变或只有微小的变化时为止，此时的模型阶次即为所求的模型阶次。

xianjin kongzhi jishu

先进控制技术 (advanced control techniques)

继经典控制和现代控制之后发展起来的一类新型控制技术。

20 世纪 50 年代以来，经典控制理论和现代控制理论的发展和应用，在自动控制领域中取得了令人满意的效果。随着科学技术的进步和工业生产、军事技术的发展，被控对象日益复杂，对控制质量的要求也日益提高。许多被控对象往往具有非线性和不确定性，难以建立精确的数学模型，有些对象甚至无法建模。对于这类系统，借助传统的控制理论很难有效处理。为了解决这类系统的控制问题，一类新型的控制技术就逐渐发展起来了。这类先进控制技术包括鲁棒控制（H_∞ 控制等）、智能控制（模糊控制、专家系统、神经网络控制等）、预测控制和滑模控制等。

xianwei cailiao

纤维材料 (fibre materials) 由纤维状物质组成，可用来制造纸或纺织物的材料的统称。纤维材料分为天然纤维、无机纤维和合成纤维三大类。天然有机纤维或合成纤维可以制成纸或各种纺织品直接用做绝缘材料；或制成纸后再浸以液体电介质成为浸渍纸用作电容器介质、电缆和变压器绝缘；或浸（涂）以绝缘树脂（胶）后经热压、卷制成绝缘层压、卷制品；或制成纺织物后用绝缘漆浸渍制成绝缘漆布（带）、漆绸等用作电机和变压器的绝缘。天然无机纤维可以单独使用，也可以同植物纤维或合成纤维结合使用，作为耐高温绝缘材料。

天然纤维　包括植物纤维和动物纤维。植物纤维有棉、麻和木纤维等，主要成分是纤维素 $(C_6H_{10}O_5)_n$，分子量较大，分子中含有 OH 基。纤维基可以形成细管状的微纤维，再由微纤维构成直径约 0.02～0.07mm 的空心管状植物纤维，使材料具有多孔性结构。植物纤维材料吸湿性大，浸渍性好，耐热性较差。吸湿后的植物纤维材料的机械强度和电气绝缘性能变差；浸渍后的植物纤维材料的介电性能大为提高。此外，通过乙酰化、氰乙基化等化学改性手段或加入添加剂也可以改善天然植物纤维的吸湿性、耐老化性能、机械强度以

及电气绝缘性能。

电工中使用的动物纤维主要为蚕丝，其形态与植物纤维大不相同，是一类光滑的长丝，其耐热性也较差。

无机纤维　电工中常用的无机纤维材料有玻璃纤维和石棉。常用作电气绝缘材料的石棉是温石棉，其主要化学组成为含结晶水的正硅酸镁盐，当温度高达450～700℃时，将失去化合水而变成粉状物。石棉的特点是耐热性很高，但其介电性能较差。石棉常用作耐高温的低压电机和电器的绝缘、密封和衬垫材料。玻璃纤维广泛应用在电机绝缘、印刷电路板中。

合成纤维　用高分子量的聚合物加于有机溶剂中（有时还加助溶剂）制成纺丝液后再用干法或湿法纺丝工艺制造。电工中应用较多的合成纤维材料是聚芳酰胺（Nomex）和聚酯。聚芳酰胺在电机制造中用作F级、H级绝缘，在变压器中也有应用。它具有较高的化学稳定性、水解稳定性和耐辐射性，耐热性好。

在电工中使用的天然纤维和合成纤维材料都要浸渍绝缘油或树脂（胶）、漆，或经脱脂加工处理，以减少吸湿性，提高耐热性，增加柔软性和弹性，提高介电性能和机械强度。

碳纤维由有机纤维（聚丙烯腈纤维、沥青纤维、粘胶丝或酚醛纤维等）经碳化及石墨化处理而得到。碳纤维既具有碳材料的固有本征特性，又兼备纺织纤维的柔软可加工性，是新一代增强纤维。它的杨氏模量为传统玻璃纤维的3倍多；碳纤维树脂复合材料抗拉强度一般在3500MPa以上，是钢的7～9倍。碳纤维的比热容及导电性介于非金属和金属之间，热膨胀系数小，耐腐蚀性好；耐冲击性较差，在强酸作用下发生氧化，与金属复合时会发生金属碳化、渗碳及电化学腐蚀现象。因此，碳纤维在使用前须进行表面处理。

随着从短纤碳纤维到长纤碳纤维的发展，碳纤维已开始在电磁屏蔽、发热材料及电缆等领域得到广泛应用。

xianchang kebiancheng menzhenlie

现场可编程门阵列　（field programmable gate array, FPGA）　一种主要由静态随机存取存储器SRAM（见半导体存储器）保存编程信息的高密度可编程逻辑器件。单个FPGA器件上能容纳上百万个晶体管，可实现时序、组合等各种复杂逻辑电路。

结构　主要由三部分组成：可组态逻辑块（configurable logic blocks, CLB）、输入/输出块（input output blocks, IOB）及可编程内部连线器（programmable interconnector, PI）。

可组态逻辑块（CLB）是FPGA的主要组成部分，是实现各种逻辑功能的基本单元，完成用户指定的逻辑功能。

输入输出块（IOB）是器件引脚和内部逻辑间的接口电路。它位于器件四周，每一个IOB控制一个I/O引脚，通过编程可将某一引脚配置为输入或者输出状态。

可编程内部连线器（PI）遍布各CLB和IOB之间，控制PI就可以确定单个CLB输入输出之间、各个CLB之间、CLB和IOB之间的连接，PI为FPGA各逻辑单元提供灵活可编程的连线方式，容易实现各种复杂的逻辑系统。

配置方式　用户对FPGA的编程信息存储在FPGA内部的静态存储器SRAM中。由于SRAM的易失性，在FPGA应用中，必须配一块非易失性配置存储器，将所有的编程信息保存在该存储器中，每次使用通电后，都必须对FPGA重新配置。FPGA的配置方式分为主动式和被动式，数据宽度有8位并行方式和串行方式两种。在主动模式下，FPGA在上电后，自动将编程信息从外部配置存储器读到内部SRAM中，实现内部结构映射。在被动模式下，FPGA作为从属器件，由相应的控制电路或微处理器提供配置所需的时序，实现配置数据的下载。在器件配置完成后，内部的寄存器以及I/O管脚进行初始化，等初始化完成以后，器件才会按照用户设计的功能正常工作。

xiandai kongzhi lilun

现代控制理论　（modern control theory）　建立在状态空间法基础上的控制理论，是自动控制理论的主要组成部分。

20世纪20～30年代诞生、40～50年代成熟的经典控制理论，用于处理单输入单输出控制系统的问题，是很有效的。20世纪50年代，空间技术迅速发展，迫切需要解决多变量系统的最优控制问题。学者们试图把经典控制理论推广到多变量系统的控制，都遭到了失败，需要寻求新的理论和方法，于是现代控制理论诞生了。现代控制理论通过对系统的状态变量描述来进行控制系统的分析和设计，基本的方法是时域方法。现代控制理论所能处理的控制问题比经典控制理论广泛得多，包括单变量系统和多变量系统、线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统、确定性系统和非确定性系统（包括随机系统和模糊系统）。

在空间技术等方面的推动下，关于现代控制理论的研究获得了积极的推进，并取得了一批杰出的成果。同时，反过来对多种工业生产和军事技术起了巨大的推动作用。1956年Л. С. 庞特里雅金（Л. С. Понтрягин）创立了极大值原理（见极小值原理）。同年，R. E. 贝尔曼（R. E. Bellman）创立了动态规划。这两者为最优控制建立了理论基础。1959年R. E. 卡尔曼（R. E. Kalman）提出了卡尔曼滤波。1960年卡尔曼提出了控制系统的可控性和可观测性。上述这些重要成果的取得标志着现代控制理论的形成。在1960年第一届全美联合自动控制会议上确认了现代控制理论这一学科。其后，世界上广泛使用这一学科名称。

学科的基本内容

线性系统理论　这是本学科的基础分支，主要研究线性控制系统的控制和观测问题，基本的分析和综合方法是状态空间法。

最优控制理论　所要解决的问题是，按照控制对象的动态特性，选择一个容许控制，使控制对象按技术要求运行，同时使性能指标达到最优。（见最优控制、最短时间控制和线性二次型最优控制）

非线性系统理论　主要成果是关于非线性现象的研究和非线性系统稳定性的判定。主要分析方法有等效线性化方法（见非线性系统的线性化方法）和李雅普诺夫直接法（见李雅普诺夫方法）。非线性系统理论远不如线性系统理论成熟和完整。由于数学处理上的困难，至今还没有一种通用的方法可用来处理所有类型的非线性系统。

随机控制理论　关于具有随机信号、随机噪声和随机特性的系统的控制理论。这里，既有最优估计问题（包括预测、滤波和平滑问题），即从受到随机干扰的输出向量估计

状态向量，又有随机最优控制问题，主要是线性二次型高斯（LQG）问题。后者可分为两部分，一是用卡尔曼滤波技术从输出求状态的估计值，另一是按确定性线性二次型最优控制问题用上述估计值求状态反馈最优控制律。（见随机控制理论、卡尔曼滤波和随机最优控制）

动态系统辨识　在系统的方程即数学模型未知的情况下，从系统输入和输出求系统的方程，同时确定模型结构和参数，这是系统辨识问题。模型结构已经确定，由输入输出估计其参数，这是参数估计问题。（见动态系统辨识）

适应控制理论　模仿生物适应能力，随时辨识系统的数学模型，据以形成及修正最优控制律的控制理论。（见适应控制系统、自校正适应控制系统和模型参考适应控制系统）

其他理论　现代控制理论的学科内容十分广泛，又非常活跃，一些新的分支在陆续崛起，其中主要的有：

（1）先进控制技术：主要有鲁棒控制（H_∞控制等）、智能控制（模糊控制、专家系统、神经网络控制等）、预测控制和滑模控制等。这类控制已超越传统控制理论范围。

（2）多变量频域方法：用多项式矩阵理论把状态空间法同经典频域方法结合起来，研究线性定常多变量控制系统的一套理论和设计方法。

（3）非线性系统理论的一些新的研究成果：双线性系统（一种特殊类型的非线性系统）理论；流形上的控制理论（微分流形是通常意义下光滑曲面概念的推广）；非线性反馈（在某些系统中比采用线性反馈有更好的性能，已由一种控制技术形成为一种控制理论）；分岔理论（研究分岔现象的特性和产生机理的数学理论）；突变论；耗散结构理论等。

展望　当今控制理论面临着处理下述问题的挑战。

非线性问题　种种非线性现象已被揭示，包括自激振荡、分谐波振荡、频率捕捉、异步抑制、分岔、混沌、奇异吸引子等，有待于深入研究。线性元件的集成不可能产生质的飞跃，但非线性元件的集成却可以产生质的飞跃，可以形成联想、学习、智能功能等，可以实现寻优的计算，元胞自动机和神经网络等都是由非线性元件组成的。非线性科学与非线性控制结合起来，将会出现光明的前景。

具柔性结构的问题　例如，轻臂机械手、大尺度太阳能帆板、系留卫星（航天器与卫星间以绳联结）等的控制。

离散事件系统的问题　这类系统状态的改变不是由时间尺度，而是由事件的产生或结束来决定，描述这类系统的模式就不是常见的方程模式。这一研究对于生产过程自动化、自动化调度、计算机通信等一系列问题有深远的意义。（见混杂系统）

此外，还要处理多模式子系统的集成、复杂的相互关联、环境的复杂多变与要求强的适应能力以及控制与决策的复杂性等问题，解决好这些问题，将为复杂系统控制理论创造条件。

xiandianliu

线电流

（line currents）　三相电路中三根端线中的电流。A、B、C三相的线电流分别为$\underline{I}_A$、$\underline{I}_B$和$\underline{I}_C$，方向由电源端指向负载端。

线电流和相电流间的关系是：①对星形联结，线电流等于对应的相电流；②对三角形联结，线电流和相电流之间的关系为

$$\underline{I}_A=\underline{I}_{BA}-\underline{I}_{AC},\ \underline{I}_B=\underline{I}_{CB}-\underline{I}_{BA},\ \underline{I}_C=\underline{I}_{AC}-\underline{I}_{CB}$$

式中$\underline{I}_{BA}$、$\underline{I}_{CB}$、$\underline{I}_{AC}$分别为A、B、C三相电源绕组中的电流。

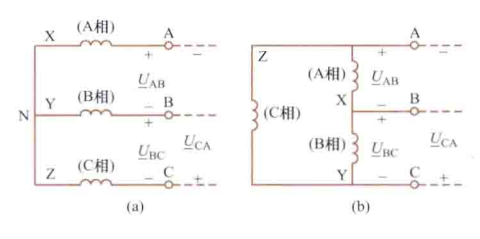
当三相电源（或三相负载）的线电流和相电流均为正序（负序）对称组时，对星形接法有$I_1=I_p$，对三角形接法有$I_1=\sqrt{3}I_p$。这里，I_1和I_p分别为线电流和相电流的有效值。

xiandianya

线电压

（line voltages）　三相电路中A、B、C三相引出线相互之间的电压。不论星形联结还是三角形联结，三个线电压分别是$\underline{U}_{AB}$、$\underline{U}_{BC}$和$\underline{U}_{CA}$，如图所示。

线电压与相电压间的关系是（以电源侧为例）：①对三角形联结，线电压等于对应的相电压；②对星形联结，则线电压与相电压之间的关系为$\underline{U}_{AB}=\underline{U}_{AN}-\underline{U}_{BN}$、$\underline{U}_{BC}=\underline{U}_{BN}-\underline{U}_{CN}$和$\underline{U}_{CA}=\underline{U}_{CN}-\underline{U}_{AN}$。



三相电源的线电压

若三相电源的相电压为正序（负序）对称组，则线电压也为正序（负序）对称组。对星形电源（或星形负载），以正序对称组为例，有

$$\underline{U}_{AB}=\underline{U}_{AN}-\underline{U}_{BN}=\sqrt{3}\underline{U}_{AN}\angle 30^\circ$$
$$\underline{U}_{BC}=\underline{U}_{BN}-\underline{U}_{CN}=\sqrt{3}\underline{U}_{BN}\angle 30^\circ$$
$$\underline{U}_{CA}=\underline{U}_{CN}-\underline{U}_{AN}=\sqrt{3}\underline{U}_{CN}\angle 30^\circ$$

可见，在对称三相电路中，不论三相电源或三相负载，在三角形接法时有$U_1=U_p$，在星形接法时有$U_1=\sqrt{3}U_p$，这里，U_1和U_p分别为线电压和相电压的有效值。

xianxing duobianliang xitong shuxue miaoshu

线性多变量系统数学描述

（mathematical description of linear multivariable systems）　具有多个输入量或（与）输出量的线性控制系统的数学描述。线性多变量系统有状态空间描述、传递函数矩阵描述、系统矩阵描述、矩阵分式描述四种形式。

（1）状态空间描述（SSD）

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{Ax}(t)+\boldsymbol{Bu}(t);\boldsymbol{y}(t)=\boldsymbol{Cx}(t)+\boldsymbol{Du}(t)\qquad(1)$$

（2）传递函数矩阵描述，又称输入输出描述（IOD）

$$\boldsymbol{G}(s)=\boldsymbol{C}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}+\boldsymbol{D};\boldsymbol{y}(s)=\boldsymbol{G}(s)\boldsymbol{u}(s)\qquad(2)$$

（3）系统矩阵描述，又称多项式矩阵描述（PMD）。

（4）矩阵分式描述（MFD）。

系统矩阵描述（PMD）　线性定常系统微分算子矩阵方程为

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{T}(D)\zeta(t)&=\boldsymbol{U}(D)\boldsymbol{u}(t)\\ \boldsymbol{y}(t)&=\boldsymbol{V}(D)\zeta(t)+\boldsymbol{W}(D)\boldsymbol{u}(t)\end{aligned}\right\}\qquad(3)$$

式中D为微分算子；$\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$、$\boldsymbol{W}$依次为$r\times r$、$r\times p$、$q\times r$、$q\times p$维算子D的多项式矩阵；$\boldsymbol{u}$为p维输入向量；$\boldsymbol{y}$为q维输出向量；$\boldsymbol{\zeta}$为r维系统向量，也称分状态向量，由系统的主要状态变量构成。

在零初始条件下对式（3）作拉普拉斯变换，得

$$\begin{bmatrix} T(s) & U(s) \\ -V(s) & W(s) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \zeta(s) \\ -u(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ -y(s) \end{bmatrix} \tag{4}$$

系统的结构框图如图1所示。

系统矩阵定义为

$$P(s)=\begin{bmatrix} T(s) & U(s) \\ -V(s) & W(s) \end{bmatrix} \tag{5}$$

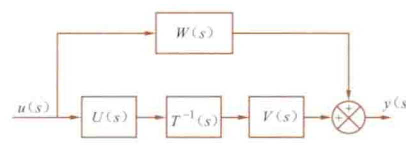


图1 系统的结构框图

有些文献称之为罗森布罗克（Rosenbrock）矩阵。若 T、U、V、W 矩阵的元素都是 s 的多项式，则称 $P(s)$ 为多项式系统矩阵；若 T、U、V、W 的元素是 s 的有理分式，则称 $P(s)$ 为有理分式系统矩阵。

用系统矩阵表示的系统方程为

$$P(s)\begin{bmatrix} \zeta(s) \\ -u(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ -y(s) \end{bmatrix} \tag{6}$$

由式（4）可得

$$\left.\begin{aligned} y(s) &= G(s)u(s) \\ G(s) &= V(s)T^{-1}(s)U(s)+W(s) \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

在零初始条件下，对式（1）作拉普拉斯变换，可得式（2）。取分状态向量为状态向量，又可得

$$P(s)=\begin{bmatrix} sI-A & B \\ -C & D \end{bmatrix} \tag{8}$$

系统矩阵描述是系统的最一般描述。由式（2）、式（4）和式（7）可知，它概括了传递函数矩阵描述；由式（1）、式（5）和式（8）可知它概括了状态空间描述。

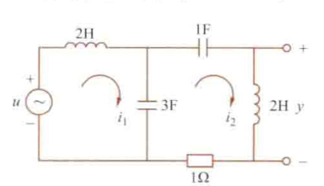


图2 电路图

如图2所示的电路，表征电路行为的微分方程以及对应于式（3）和式（7）的描述分别写出如下。

$$\begin{cases} 2\dfrac{di_1}{dt}+\dfrac{1}{3}\displaystyle\int(i_1-i_2)dt=u \\ -\dfrac{1}{3}\displaystyle\int i_1 dt+\dfrac{1}{3}\int i_2 dt+\int i_2 dt+2\dfrac{di_2}{dt}+i_2=0 \\ y=2\dfrac{di_2}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} 6D^2+1 & -1 \\ -1 & 6D^2+3D+4 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 3D \\ 0 \end{bmatrix}u \\ y=[0 \quad 2D]\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}+[0]u \end{cases}$$

$$T(s)=\begin{bmatrix} 6s^2+1 & -1 \\ -1 & 6s^2+3s+4 \end{bmatrix};\ U(s)=\begin{bmatrix} 3s \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V(s)=[0 \quad 2s];\ W(s)=0$$

矩阵分式描述（MFD） 按一定条件把 $G(s)$ 分解为矩阵分式

$$G(s)=N_r(s)D_r^{-1}(s)=D_l^{-1}(s)N_l(s) \tag{9}$$

前者称为右MFD，后者称为左MFD，$D_r(s)$、$D_l(s)$ 为非奇异多项式矩阵，且有

$$\begin{cases} D_r(s)\zeta(s)=u(s) \\ y(s)=N_r(s)\zeta(s) \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} D_r(s) & I \\ -N_r(s) & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \zeta(s) \\ -u(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ -y(s) \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{cases} \zeta(s)=N_l(s)u(s) \\ -D_l^{-1}(s)\zeta(s)=-y(s) \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} I & N_l(s) \\ -D_l^{-1}(s) & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \zeta(s) \\ -u(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ -y(s) \end{bmatrix} \tag{13}$$

对于右MFD和左MFD，分别有

$P(s)=\begin{bmatrix} D_r(s) & I \\ -N_r(s) & 0 \end{bmatrix}$ 和 $P(s)=\begin{bmatrix} I & N_l(s) \\ -D_l^{-1}(s) & 0 \end{bmatrix}$。这表明，PMD也概括了右MFD和左MFD。

多变量频域方法是线性系统理论中建立在频率域分析基础上的理论和方法，所用的数学描述即PMD和MFD。这种方法能全面反映系统的内部特性，集约程度高，物理概念清晰，便于设计调整。

xianxing ercixing ciyou kongzhi

线性二次型次优控制

（linear quadratic sub-optimal control） 使用二次型性能指标的线性定常系统次优控制或准最优控制。线性二次型最优控制要求使用全部状态变量反馈，因为最优控制应该由反映系统内部状态的全部信息参与组合。但在工程实际中，并非所有的状态变量都是能够测取或易于测取的。例如，最优控制规律为 $u^*=Kx$，x 是状态向量，u^* 是最优控制，但矩阵 K 的元素不是都能自由选择的。还由于系统在物理方面的约束，某些增益被固定了，相对缺少灵活性。再者，全部状态可能不能都被取来供反馈，而必须构造状态观测器，相对而言复杂性加大。

这样，就出现了次优控制问题。此时，只使用能够取到的状态变量实施反馈，反馈矩阵 K 的某些元素则是受约束的。这样，达不到“最优”，只能是“次优”。

定常系统的状态方程为

$$\dot{x}=Ax+Bu \tag{1}$$

式中 x 为 n 维状态向量；u 为 p 维控制向量。

设系统完全可控，性能指标为

$$J=\frac{1}{2}\int_0^\infty (x^T Qx+u^T Ru)dt \tag{2}$$

式中 R 为正定实常数对称矩阵；Q 为正半定实常数对称矩阵。设矩阵对 $\{A, \Gamma^T\}$ 可观测。Γ 由下式定义：$\Gamma\Gamma^T=Q$。

次优控制规律是诸状态变量的线性组合

$$u(t)=Kx(t) \tag{3}$$

式中 K 为 $p\times n$ 常数矩阵。闭环系统的方程为

$$\dot{x}(t)=(A+BK)x(t) \tag{4}$$

将控制向量表达式（3）代入式（2），得

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2}\int_0^\infty (x^T Qx+x^T K^T RKx)dt \\ &= \frac{1}{2}\int_0^\infty x^T(Q+K^T RK)x dt \end{aligned} \tag{5}$$

应用李雅普诺夫方法，设一个李雅普诺夫函数

$$V(x)=\frac{1}{2}x^T Px \tag{6}$$

式中 P 为正定实常数对称矩阵。随之，有

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \frac{1}{2}(\dot{x}^T Px+x^T P\dot{x}) \\ &= \frac{1}{2}x^T[(A+BK)^T P+P(A+BK)]x \end{aligned} \tag{7}$$

接着可建立下述方程，$\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{K}$ 的函数关系由之确定

$$(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{BK})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{BK})+\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{RK}+\boldsymbol{Q}=0 \quad (8)$$

关于 $\boldsymbol{K}$ 的全部可用的元素 k_{ij}，使 $J=\frac{1}{2}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0)\boldsymbol{Px}(0)$ 取极小，即令

$$\frac{\partial}{\partial k_{ij}}[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0)\boldsymbol{Px}(0)]=0 \quad (9)$$

可以得到次优控制规律。对应于次优控制的矩阵 $\boldsymbol{K}$ 还必须满足进一步的约束，使闭环系统是渐近稳定的。

有些情况下，将输出向量乘以适当的反馈矩阵，构成控制向量，这就是输出反馈。具有输出反馈的调节器也是一种次优控制，它的反馈信息是不完全的。但是，次优控制不是只有输出反馈一种情况。具有输出反馈的调节器与输出调节器是不同的，输出调节器性能指标向输出变量提要求，但其最优控制规律还是全状态反馈。

xianxing ercixing zuiyou kongzhi

线性二次型最优控制 （linear quadratic optimal control） 使用二次型性能指标的线性系统最优控制。它可得到状态线性反馈的最优控制规律，便于实现闭环最优控制，是应用广泛的最优控制方式。

线性系统状态方程及输出方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{y}(t)=\boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x}(t) \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{x}(t)$ 为 n 维状态向量；$\boldsymbol{u}(t)$ 为 p 维控制向量；$\boldsymbol{y}(t)$ 为 q 维输出向量。设 $\boldsymbol{z}(t)$ 为理想输出向量，与 $\boldsymbol{y}(t)$ 同维数，并定义

$$\boldsymbol{e}(t)=\boldsymbol{z}(t)-\boldsymbol{y}(t) \quad (3)$$

为误差向量。线性二次型最优控制问题的性能指标为

$$J=\frac{1}{2}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t_f)\boldsymbol{Fe}(t_f)+\frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}[\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}(t)\boldsymbol{e}(t)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}(t)\boldsymbol{u}(t)]\mathrm{d}t \quad (4)$$

式中权函数 $\boldsymbol{F}$、$\boldsymbol{Q}(t)$ 为正半定矩阵，$\boldsymbol{R}(t)$ 为正定矩阵。假设 t_f 固定。要求寻找最优控制 $\boldsymbol{u}^*(t)$，使性能指标 J 为最小。被积函数的第一项表明误差 $\boldsymbol{e}(t)$ 的大小，是非负的。其第二项表明控制功率的大小，对应于 $\boldsymbol{u}\neq 0$ 它恒为正。因此，对 $\boldsymbol{u}(t)$ 往往不需再加约束，而常设 $\boldsymbol{u}(t)$ 为自由的。性能指标的第一项则表示终值误差。

状态调节器问题　系统状态方程如式（1）所示，$\boldsymbol{u}(t)$ 不受约束，t_f 固定，性能指标为

$$J=\frac{1}{2}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t_f)\boldsymbol{Fx}(t_f)+\frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}(t)\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}(t)\boldsymbol{u}(t)]\mathrm{d}t \quad (5)$$

寻找最优控制 $\boldsymbol{u}^*(t)$，使性能指标 J 为最小。

用极小值原理或动态规划法，可得下列矩阵黎卡提微分方程（一阶非线性微分方程）

$$\dot{\boldsymbol{P}}(t)=-\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{A}(t)-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}(t)+\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}(t)-\boldsymbol{Q}(t) \quad (6)$$

其边界条件为

$$\boldsymbol{P}(t_f)=\boldsymbol{F} \quad (7)$$

由式（6）解出 $P(t)$ 后，可得最优控制规律为

$$\boldsymbol{u}^*(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{x}^*(t) \quad (8)$$

由式（8）可以看出，最优控制规律是一个状态线性反馈规律，控制向量 $\boldsymbol{u}^*(t)$ 由状态向量 $\boldsymbol{x}^*(t)$ 生成，构成状态反馈，并且呈线性关系。这样，能方便地实现闭环最优控制，这一点在工程上具有十分重要的意义。

$\boldsymbol{P}(t)$ 是一对称矩阵，一般都要由计算机求出方程（6）的数值解。$\boldsymbol{P}(t)$ 是时间函数，即使线性系统是定常的，为了实现最优控制，反馈增益应该是时变的，而不是常值反馈增益。这一点与经典控制方法的结论有本质的差别。

可以求得性能指标的最小值为

$$J^*=\frac{1}{2}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t_0)\boldsymbol{P}(t_0)\boldsymbol{x}(t_0) \quad (9)$$

$t_f=\infty$ 时的状态调节器问题　定常系统方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{Ax}(t)+\boldsymbol{Bx}(t) \quad (10)$$

这里，$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 为常值矩阵，$\boldsymbol{u}(t)$ 不受约束，性能指标为

$$J=\frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty}[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Qx}(t)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Ru}(t)]\mathrm{d}t \quad (11)$$

式中 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 为常值矩阵，$\boldsymbol{Q}$ 为正半定的，$\boldsymbol{R}$ 为正定的。求最优控制 $\boldsymbol{u}^*(t)$，使性能指标 J 为最小。

对于这样的系统，有 $\dot{\boldsymbol{P}}(t)=\boldsymbol{0}$ 情况下的矩阵黎卡提方程

$$\boldsymbol{PA}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{PBR}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{0} \quad (12)$$

上式是矩阵黎卡提代数方程，它是非线性方程。求解该方程，可得最优控制为

$$\boldsymbol{u}^*(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Px}^*(t) \quad (13)$$

性能指标的最小值也由式（9）求得。

输出调节器问题　系统动态方程为式（1）、式（2），$\boldsymbol{u}(t)$不受约束，t_f 固定，性能指标为

$$J=\frac{1}{2}\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(t_f)\boldsymbol{Fy}(t_f)+\frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}[\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}(t)\boldsymbol{y}(t)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}(t)\boldsymbol{u}(t)]\mathrm{d}t \quad (14)$$

式中 $\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{Q}(t)$ 为正半定矩阵；$\boldsymbol{R}(t)$ 为正定矩阵。求最优控制 $\boldsymbol{u}^*(t)$，使性能指标 J 为最小。

可将这类问题转化成等效的状态调节器问题，得：当且仅当系统完全可观测时，存在唯一的最优控制

$$\boldsymbol{u}^*(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{x}^*(t) \quad (15)$$

其中，$\boldsymbol{P}(t)$ 满足下列矩阵黎卡提方程

$$\dot{\boldsymbol{P}}(t)=-\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{A}(t)-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}(t)+\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}(t)-\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}(t)\boldsymbol{C}(t) \quad (16)$$

$$\boldsymbol{P}(t_f)=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t_f)\boldsymbol{FC}(t_f) \quad (17)$$

输出调节器的最优控制规律，并不是输出量 $\boldsymbol{y}(t)$ 的线性反馈，而仍是状态 $\boldsymbol{x}(t)$ 的线性反馈。仅由输出反馈时，没有充分利用全部信息，不能构成最优控制。

完全可控、可观测的定常系统，$t_f=\infty$时的输出调节器问题，其最优控制存在并且是唯一的

$$\boldsymbol{u}^*(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Px}^*(t) \quad (18)$$

$\boldsymbol{P}$ 为下列矩阵黎卡提代数方程的解

$$-\boldsymbol{PA}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{PBR}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{QC}=\boldsymbol{0} \quad (19)$$

跟踪问题　系统动态方程为式（1）、式（2），$\boldsymbol{x}(t_0)=x_0$，系统完全可观测，理想输出为 $\boldsymbol{z}(t)$，误差向量为式（3），性能指标为式（4），$\boldsymbol{u}(t)$ 不受约束，t_f固定，求最优控制 $\boldsymbol{u}^*(t)$，使性能指标 J 为最小。

用极小值原理来求解，并设

$$\boldsymbol{\lambda}^*(t)=\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{x}^*(t)-\boldsymbol{g}(t) \quad (20)$$

可写出形如式（16）的黎卡提方程以及下式

$$\dot{\boldsymbol{g}}(t)=-[\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(t)-\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}(t)]\boldsymbol{g}(t)-\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}(t)\boldsymbol{z}(t) \quad (21)$$

其边界条件为

$$\boldsymbol{P}(t_f)=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t_f)\boldsymbol{F}\boldsymbol{C}(t_f) \quad (22)$$

$$\boldsymbol{g}(t_f)=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}(t_f)\boldsymbol{F}\boldsymbol{z}(t_f) \quad (23)$$

从而得最优控制规律

$$\boldsymbol{u}^*(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}(t)[\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{x}^*(t)-\boldsymbol{g}(t)] \quad (24)$$

对于线性定常系统，当理想输出 $\boldsymbol{z}(t)$ 为常值、终端时刻 t_f 极大但不为无穷大时，可以导出一个近似的最优控制规律如下，它具有很大的实用意义。

设系统状态方程如式（10）所示，$\boldsymbol{x}(t_0)=\boldsymbol{x}_0$，输出方程 $\boldsymbol{y}(t)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t)$，系统完全可控并完全可观测，理想输出 $\boldsymbol{z}(t)=\boldsymbol{z}_0$，$t_f$ 足够大，性能指标为

$$J=\frac{1}{2}[\boldsymbol{z}_0-\boldsymbol{y}(t_f)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}[\boldsymbol{z}_0-\boldsymbol{y}(t_f)]+\frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}\{[\boldsymbol{z}_0-\boldsymbol{y}(t)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}[\boldsymbol{z}_0-\boldsymbol{y}(t)]+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(t)\}\mathrm{d}t \quad (25)$$

则其最优控制存在并唯一，为

$$\boldsymbol{u}^*(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}^*(t)+\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{g} \quad (26)$$

其中 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{g}$ 依次满足下列两式

$$-\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{C}=0 \quad (27)$$

$$\boldsymbol{g}=[\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}]^{-1}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{z}_0 \quad (28)$$

xianxing kongzhi xitong

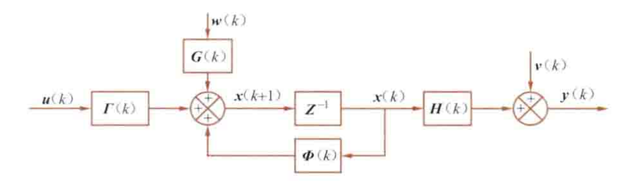
线性控制系统 （linear control system） 状态变量和输出变量对于所有可能的输入变量和初始状态都满足叠加原理的系统。叠加原理是指，如果单输入单输出系统相应于两种输入和初始状态（u_1，x_1^0）和（u_2，x_2^0）时的状态和输出分别为（x_1，y_1）和（x_2，y_2），则当输入和初始状态为（$a_1u_1+a_2u_2$，$a_1x_1^0+a_2x_2^0$）时，系统的状态和输出必为（$a_1x_1+a_2x_2$，$a_1y_1+a_2y_2$），这里 x_1、x_2 表示状态，x_1^0、x_2^0 表示初始状态，u_1、u_2 表示输入，y_1、y_2 表示输出，a_1、a_2 为任意实数。如果 x、u、y 分别改成状态向量 $\bar{\boldsymbol{x}}$、输入向量 $\bar{\boldsymbol{u}}$、输出向量 $\bar{\boldsymbol{y}}$，则以上陈述也适用于多输入多输出线性控制系统。

由定常（参数不随时间变化，亦称非时变）集中参数元件组成的，可以用线性常系数微分方程（或差分方程）描述的系统，称为连续型（或离散型）线性定常系统。如果描述线性系统的微分方程（或差分方程）的系数是时间的函数，则称为线性时变系统。

严格地说，物理系统总存在着不同程度的非线性。线性系统是用线性方程描述的，数学处理简单，已形成了相当成熟的线性控制理论。因此，对于一个实际的系统，在满足工程实用要求的前提下，总是尽可能将其线性化，然后用线性控制理论进行分析。

xianxing zuixiao fangcha guji

线性最小方差估计 （linear minimum variance estimation） 以估计误差的方差阵最小作为估计准则，并限定估计是测量的线性函数的估计。对线性最小方差估计，只要知道被估计量 $\boldsymbol{X}$ 和测量 $\boldsymbol{Y}$ 的数学期望 $\mathrm{E}[\boldsymbol{X}]$、$\mathrm{E}[\boldsymbol{Y}]$，方差 $\mathrm{Var}\boldsymbol{X}$、$\mathrm{Var}\boldsymbol{Y}$ 及协方差 $\mathrm{Cov}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})$ 等统计特性，不需要知道 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$ 的联合概率分布密度。这样，使计算量大为减少。由于这种方法比较简单，因而获得比较广泛的应用。



离散系统的状态空间模型

在随机干扰作用下的离散系统的状态空间模型，如图所示。

系统的状态方程和输出方程分别为

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{\Phi}(k)\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{\Gamma}(k)\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{w}(k) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{v}(k) \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{u}(k)$ 为系统的非随机控制输入；$\boldsymbol{w}(k)$ 和 $\boldsymbol{v}(k)$ 分别为模型噪声和量测噪声，它们的最基本类型为零均值的正态白噪声序列。

假定 $\{\boldsymbol{X}(k)\}$、$\{\boldsymbol{Y}(k)\}$ 是两个多维随机向量序列。其中 $\{\boldsymbol{X}(k)\}$ 表示系统的未知状态；$\{\boldsymbol{Y}(k)\}$ 表示系统的输出观测。已知 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$ 的统计特性 $\mathrm{E}[\boldsymbol{X}]$、$\mathrm{E}[\boldsymbol{Y}]$、$\mathrm{Var}\boldsymbol{X}$、$\mathrm{Var}\boldsymbol{Y}$，$\mathrm{Cov}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})$ 和 $\mathrm{Cov}(\boldsymbol{Y},\boldsymbol{X})$。假定 $\boldsymbol{X}$ 的估计 $\hat{\boldsymbol{X}}$ 是 $\boldsymbol{Y}$ 的线性函数，即

$$\hat{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{Y})=\boldsymbol{b}+\boldsymbol{A}\boldsymbol{Y} \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{b}$ 为 n 维非随机常数向量；$\boldsymbol{A}$ 为 $n\times q$ 维非随机常数矩阵。

估计误差的方差阵为

$$J=E\{[\boldsymbol{X}-\boldsymbol{b}-\boldsymbol{A}\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{X}-\boldsymbol{b}-\boldsymbol{A}\boldsymbol{Y}]^{\mathrm{T}}\} \quad (4)$$

可以求得系统状态的估计为

$$\hat{\boldsymbol{X}}=\mathrm{E}[\boldsymbol{X}]+\mathrm{Cov}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})(\mathrm{Var}\boldsymbol{Y})^{-1}[\boldsymbol{Y}-\mathrm{E}(\boldsymbol{Y})] \quad (5)$$

对上式等号两边取数学期望，得

$$\mathrm{E}[\hat{\boldsymbol{X}}]=\mathrm{E}[\boldsymbol{X}]+\mathrm{Cov}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})(\mathrm{Var}\boldsymbol{Y})^{-1}\mathrm{E}[\boldsymbol{Y}-\mathrm{E}(\boldsymbol{Y})]=\mathrm{E}[\boldsymbol{X}] \quad (6)$$

可见，估计误差的数学期望为零向量，即

$$\mathrm{E}[\boldsymbol{X}-\hat{\boldsymbol{X}}]=0 \quad (7)$$

所以，线性最小方差估计是无偏估计。

xiangdui wendingxing

相对稳定性 （relative stability） 稳定的控制系统的稳定程度。一个控制系统能够正常工作，首先应具有绝对稳定性，即系统是稳定的，同时还必须具备适当的相对稳定性，要有稳定性裕量。开环频率特性为

$$G(\mathrm{j}\omega)H(\mathrm{j}\omega)=\frac{K(1+\mathrm{j}\omega T_a)(1+\mathrm{j}\omega T_b)\cdots}{(\mathrm{j}\omega)^{\lambda}(1+\mathrm{j}\omega T_1)(1+\mathrm{j}\omega T_2)\cdots}$$

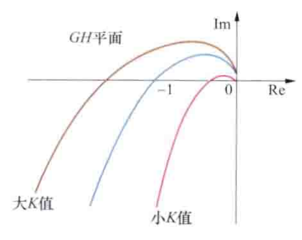


图1 控制系统极坐标图

的控制系统的极坐标图如图1所示，图中三条曲线对应于三个不同开环增益 K 值的情况。对应于大的 K 值，系统是不稳定的；当 K 值减小到一定值时，$G(\mathrm{j}\omega)H(\mathrm{j}\omega)$ 轨迹通过复平面上（−1，j0）点，系统处于从不稳定到稳定的临界

情况；对应于小的 K 值，系统是稳定的。

开环频率特性 $G(j\omega)H(j\omega)$ 轨迹对复平面上（-1，j0）点的靠近程度，可以用来度量相对稳定性。通常以相位裕量和增益裕量来表示这种靠近的程度。图 2 表示稳定系统和不稳定系统在频率特性的极坐标图、对数坐标图和对数幅相图中的相位裕量和增益裕量。

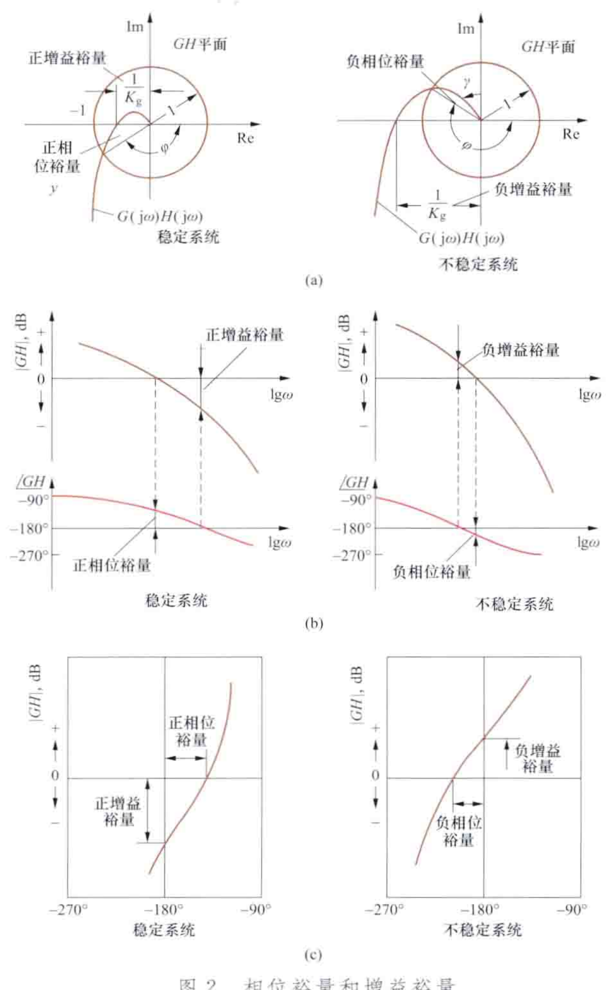


图 2　相位裕量和增益裕量

（a）极坐标图；（b）对数坐标图；（c）对数幅-相图

在增益交界频率上，使系统达到不稳定边缘所需要的附加相位滞后量，称为相位裕量。所谓增益交界频率，是指开环传递函数的模 $|G(j\omega)H(j\omega)|$ 等于 1 时的频率。为了使最小相位系统稳定，相位裕量必须为正值。

在相位交界频率上，$|G(j\omega)H(j\omega)|$ 的倒数称为增益裕量（以分贝表示）。所谓相位交界频率，是开环传递函数的相角等于 $-180°$ 时的频率。对于稳定的最小相位系统而言，增益裕量指出了在变成不稳定的系统之前，增益能够增加多少；对于不稳定的系统而言，增益裕量指出了使系统稳定增益应当减小多少。

仅仅用增益裕量或仅仅用相位裕量，都不足以说明系统的相对稳定性，而必须同时用这两个量。对于最小相位系统，相位裕量应为 30°～60°，增益裕量应大于 6dB。

xiangying

响应　(response)　系统在激励作用下所引起的反应。独立电源（作为激励）作用于某个线性电路时，电路中其他元件的电流或电压是响应。通过独立电压源的电流和独立电流源的端电压也是响应。在自动控制系统里，在输入（作为激励）的作用下，输出和状态变量是响应。

xiangdianliu

相电流　(phase currents)　流经三相电源或三相负载每一相的电流。以三相电源为例，在星形联结时（设中性点为 N），其 A 相、B 相和 C 相的相电流分别为 $\underline{I}_{NA}$、$\underline{I}_{NB}$、$\underline{I}_{NC}$；三角形联结时，其 A 相、B 相和 C 相的相电流分别为 $\underline{I}_{BA}$、$\underline{I}_{CB}$ 和 $\underline{I}_{AC}$。

xiangdianya

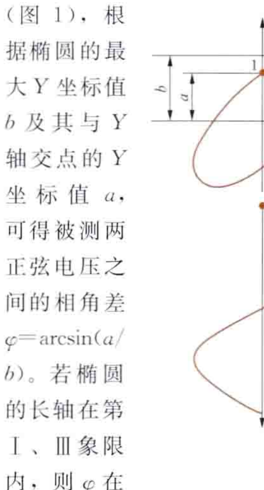
相电压　(phase voltages)　三相电源或三相负载每一相绕组（负载）两端的电压。在星形联结时（设中性点为 N）为端线与中性点 N 之间的电压，其 A 相、B 相和 C 相的相电压分别为 $\underline{U}_{AN}$、$\underline{U}_{BN}$、$\underline{U}_{CN}$；在三角形联结时为端线与端线之间电压，其 A 相、B 相和 C 相的相电压则分别为 $\underline{U}_{AB}$、$\underline{U}_{BC}$ 和 $\underline{U}_{CA}$。

xiangjiao celiang

相角测量　(phase angle measurement)　两个同频率正弦电参量相角差值的测量。相角的单位为度（°）或弧度（rad），并以正负号表示超前或滞后关系。具体有相位表法、利萨如图形法和三电压表法等。

相位表法　直接使用指针式相位表或数字相位表测量相角的方法。也可用功率因数表测量同频率正弦电压、电流间的相角差。

利萨如图形法　将两同频率正弦电压信号 u_X、u_Y 分别加到示波器的 X 轴、Y 轴输入端，根据示波器屏幕上显示的利萨如图形来判断相角差。一般情况下，利萨如图形为椭圆（图 1），根据椭圆的最大 Y 坐标值 b 及其与 Y 轴交点的 Y 坐标值 a，可得被测两正弦电压之间的相角差 $\varphi=\arcsin(a/b)$。若椭圆的长轴在第Ⅰ、Ⅲ象限内，则 φ 在 $\pm(0\sim\pi/2)$ 之间；若椭圆的长轴在第Ⅱ、Ⅳ象限内，则 φ 在 $\pm(\pi/2\sim\pi)$ 之间。此法的缺点是不能判断两信号中哪一个超前或滞后；且当 φ 值较小时，因 b 值很小，一般较难测准。



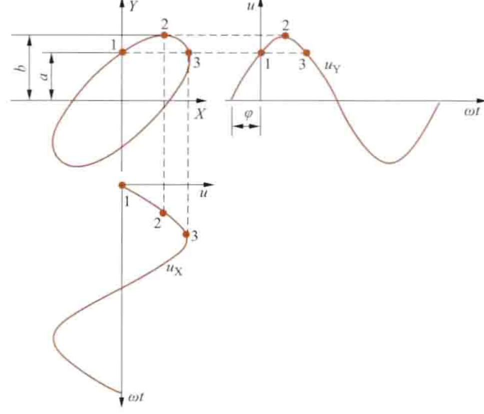


图 1　利萨如图形法

三电压表法　使用三电压表法要求两电压信号有一公共点。图 2 中画出了两正弦电压的相量，公共点为 A 点，相角差为 φ。用三块电压表分别测量（或用一块电压表逐个测量）两

电压U_1、U_2以及它们的差值U_{12}。由测得的电压值，按公式$\varphi=\arccos[(U_1^2+U_2^2-U_{12}^2)/(2U_1U_2)]$可算得它们之间的相角差。对$\varphi$很小的情况，先将两电压中较大的一个分压，并使分压后两电压数值相同（图 3）。测量$U_1(=U_2)$及U_{12}值，根据公式$\varphi\approx U_{12}/U_1$，即可求得它们之间的相角差。

图 2　三电压表法相量图

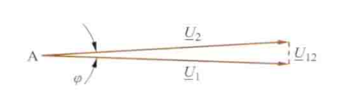


图 3　小相角的测量

xiangliang

相量　(phasor)　用于表示正弦量的复数形式的量。它的模代表正弦量的方均根值，它的辐角代表正弦量的初相位。

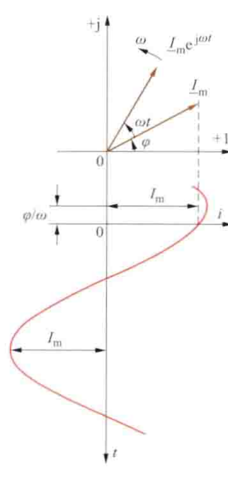
以正弦电流为例说明正弦量的相量表示。设正弦电流i的函数表示为$i=I_m\cos(\omega t+\varphi)$，其中$I_m$为电流$i$的幅值，$\omega$为其角频率。$(\omega t+\varphi)$为相位，$\varphi$为其初相位。令$j=\sqrt{-1}$，应用数学中的欧拉公式将复函数$I_m e^{j(\omega t+\varphi)}$表示为

$$I_m e^{j(\omega t+\varphi)}=I_m\cos(\omega t+\varphi)+jI_m\sin(\omega t+\varphi)$$

可见，正弦电流i等于复函数$I_m e^{j(\omega t+\varphi)}$的实部，即

$$i=\mathrm{Re}[I_m e^{j(\omega t+\varphi)}]=\mathrm{Re}[I_m e^{j\varphi}e^{j\omega t}]$$

式中“Re”表示取实部；$I_m e^{j\varphi}$是复常数，记$\underline{I}_m=I_m e^{j\varphi}=I_m\angle\varphi$，称$\underline{I}_m$为正弦电流$i$对应的相量。$\underline{I}_m$的模$I_m$代表正弦电流的幅值，辐角$\varphi$代表正弦电流的初相位。记$i$的有效值为$I$。电力工程中常将正弦电流相量的模用有效值表示，记$\underline{I}=Ie^{j\varphi}=I\angle\varphi$。正弦电流与它的相量是一一对应的。



正弦量的相量表示

相量$\underline{I}_m$可在复数平面上用一矢量来表示，其长度为I_m，由实轴起算辐角为φ（见图）。复函数$I_m e^{j(\omega t+\varphi)}=\underline{I}_m e^{j\omega t}$，在复数平面中可表示为由初始位置$\underline{I}_m$开始，以角速度$\omega$逆时针方向旋转的矢量，称为旋转相量。在任一时刻$t$，旋转相量的辐角就是$(\omega t+\varphi)$，它在实轴上的分量就等于该正弦电流的瞬时值。这也是$i=\mathrm{Re}[I_m e^{j(\omega t+\varphi)}]=\mathrm{Re}[\underline{I}_m e^{j\omega t}]$的几何含义。

xiangliangfa

相量法　(phasor method)　以相量表示正弦量的线性电路正弦稳态分析的方法。1893 年美国学者 C. P. 施泰因梅茨（C. P. Steinmetz）提出用相量代表正弦量，正弦量的加、减、导数、积分等运算转换为相应相量的代数运算；多个同频率正弦量的代数和转换为对应相量的代数和；正弦量对时间的导数（或积分）转换为对应的相量与$j\omega$（或$1/j\omega$）的乘积，使描述正弦稳态电路的微分（积分）方程转换为复数的代数方程。相量法极大地简化了线性电路在正弦波形激励下稳态响应的分析。

基尔霍夫定律的相量形式　利用相量，可将基尔霍夫两条定律的瞬时值表达式$\sum i=0$（KCL）和$\sum u=0$（KVL）转换为相量（复数）表达的形式，即

$$\sum\underline{I}=0,\ \sum\underline{U}=0$$

上式可称为基尔霍夫定律的相量形式。

电阻、电感、电容元件约束关系的相量形式　电阻、电感和电容的电压、电流的相量关系如表 1 所示。

表 1　电阻、电感和电容元件的约束关系

符号与参考方向	瞬时值关系式	相量关系式	相量图	说明
i_R，u_R，R	$u_R=Ri_R$	$\underline{U}_R=R\underline{I}_R$	$\underline{I}_R$　$\underline{U}_R$	$U_R=RI_R$ $\underline{U}_R$与$\underline{I}_R$同相
i_L，u_L，L	$u_L=L\dfrac{di_L}{dt}$	$\underline{U}_L=j\omega L\underline{I}_L$	$\underline{U}_L$　$\underline{I}_L$	$U_L=\omega LI_L$ $\underline{U}_L$领先$\underline{I}_L$ 90°
i_C，u_C，C	$u_C=\dfrac{1}{C}\int i_C\,dt$	$\underline{U}_C=\dfrac{1}{j\omega C}\underline{I}_C$	$\underline{I}_C$　$\underline{U}_C$	$U_C=\dfrac{1}{\omega C}I_C$ $\underline{U}_C$滞后$\underline{I}_C$ 90°

阻抗与导纳　在正弦稳态下，线性非时变二端电路的电压和电流具有相同的频率，其相互关系可通过阻抗和导纳参数表示。

阻抗Z　电压相量$\underline{U}$和电流相量$\underline{I}$之比

$$Z=\frac{\underline{U}}{\underline{I}}=|Z|\angle\theta=R+jX$$

是一具有电阻量纲的复数，称为该二端电路的复数阻抗，简称阻抗。复数阻抗的实部称为电阻，虚部称为电抗。上式也称为欧姆定律的相量形式。上式表明，阻抗Z可写成极坐标形式和直角坐标形式，其中

阻抗模　$|Z|=U/I$，反映电压、电流大小之比。

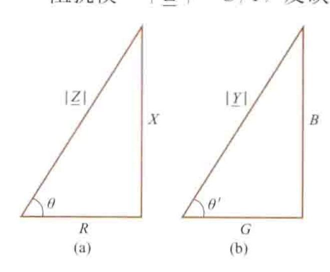


图 1　阻抗和导纳三角形
(a) 阻抗三角形；(b) 导纳三角形

阻抗角　θ代表电压领先于电流的相位差角。

电阻　$R=|Z|\cos\theta$

电抗　$X=|Z|\sin\theta$

上述参数之间的数量关系可用图 1 (a) 中的阻抗三角形表示。

导纳Y　电流相量$\underline{I}$和电压相量$\underline{U}$之比

$$\underline{Y}=\frac{\underline{I}}{\underline{U}}=|\underline{Y}|\angle\theta'=G+\mathrm{j}B$$

是一具有电导量纲的复数，称为该二端电路的复数导纳，简称导纳。复数导纳的实部称为电导，虚部称为电纳。对于同一个线性非时变二端电路，显然有 $\underline{Y}=1/\underline{Z}$。同样可定义

导纳模　$|\underline{Y}|=I/U$ 反映电流、电压大小之比

导纳角　θ'代表电流领先电压的相位差角

电导　$G=|\underline{Y}|\cos\theta'$

电纳　$B=|\underline{Y}|\sin\theta'$

上述参数间的数量关系可用图 1（b）中的导纳三角形表示。

电阻元件、电感元件和电容元件都可分别作为阻抗元件和导纳元件的特例，表 2 中列出它们相应的参数。

表 2　R、L、C 元件的阻抗和导纳

元件	阻抗 $\underline{Z}$	电阻 R	电抗 X	导纳 $\underline{Y}$	电导 G	电纳 B
R	R	R	0	$1/R$	$1/R$	0
L	$\mathrm{j}\omega L$	0	$X_L=\omega L$	$-\mathrm{j}\frac{1}{\omega L}$	0	$B_L=-\frac{1}{\omega L}$
C	$-\mathrm{j}\frac{1}{\omega C}$	0	$X_C=-\frac{1}{\omega C}$	$\mathrm{j}\omega C$	0	$B_C=\omega C$

电路方程的相量形式　基尔霍夫定律和欧姆定律的相量形式与电阻电路中所用的对应公式在形式上相似。因此，在线性非时变电路中，计算电阻电路的各种方法、原理和定理也完全适用于计算正弦交流电路的稳态响应，其差别仅在于，此时电压、电流采用相量形式，而支路参数则用复数阻抗 $\underline{Z}$ 或导纳 $\underline{Y}$ 表示。例如，阻抗元件 $\underline{Z}_1$、$\underline{Z}_2$ 和 $\underline{Z}_3$ 相串联时，其等效阻抗 $\underline{Z}=\underline{Z}_1+\underline{Z}_2+\underline{Z}_3$；而导纳元件 $\underline{Y}_1$、$\underline{Y}_2$ 和 $\underline{Y}_3$ 相并联时，其等效导纳 $\underline{Y}=\underline{Y}_1+\underline{Y}_2+\underline{Y}_3$。为了方便，有时在电路图中，将正弦电压、电流直接以相量来标注，电路参数直接以复数阻抗来标注，称为电路的相量模型。

将相量形式的基尔霍夫定律和欧姆定律应用于电路的相量模型，建立电路的相量形式的方程并求解，即可得到电路的正弦稳态响应。

图 2（a）为 RLC 串联电路，图 2（b）是串联电路的相量模型。串联总阻抗

$$\begin{aligned}\underline{Z}&=R+\mathrm{j}X_L+\mathrm{j}X_C\\&=R+\mathrm{j}(X_L+X_C)\\&=R+\mathrm{j}X=|\underline{Z}|\angle\theta\end{aligned}$$

式中

$$|\underline{Z}|=\sqrt{R^2+X^2}$$

$$\theta=\arctan(X/R)$$

由相量形式的欧姆定律得到各电压和电流的相量关系为

$$\begin{aligned}\underline{U}&=\underline{Z}\,\underline{I}=(|\underline{Z}|\angle\theta)\underline{I}\\&=(\sqrt{R^2+X^2}\angle\theta)\underline{I}\end{aligned}$$

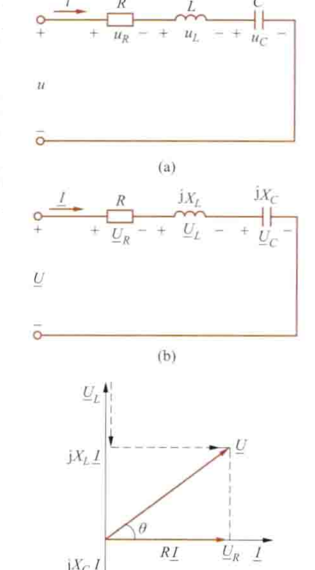


图 2　RLC 串联电路、相量模型及相量图
（a）电路图；（b）相量模型；（c）相量图

$$\underline{U}_R=R\underline{I}$$

$$\underline{U}_L=\mathrm{j}X_L\underline{I}=\mathrm{j}\omega L\underline{I}$$

$$\underline{U}_C=-\mathrm{j}\frac{1}{\omega C}\underline{I}$$

求解上面的复系数代数方程，得到所求响应的相量，进而得出其对应的正弦稳态响应。

电路中各电压、电流的相量图如图 2（c）所示。

xiangliangtu

相量图　（phasor diagram）　在复平面上用有向线段表示正弦量相量的图形。同频率的正弦电压或电流的相量，由于旋转角速度相同，任何时刻它们之间的相对位置保持不变。因此，在画相量图时，只画出各相量的初始位置。从相量图上可以十分清晰地看出各相量的大小和相位间的关系。

xiangpingmianfa

相平面法　（phase plane method）　对二阶控制系统，在以变量 $x_1=x$ 及其一阶导数 $x_2=\dot{x}$ 为坐标轴的相平面上，研究系统的运动轨迹的图解方法。当系统的非线性程度高，不能只考虑基波分量时，或者需要研究系统在各种初始状态下的运动状态时，使用相平面法较为方便。

一个二阶控制系统可以用下述常微分方程描述

$$\ddot{x}+f(x,\dot{x})=0$$

式中 $\dot{x}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$；$\ddot{x}=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$；$f(x,\dot{x})$ 为 x 和 $\dot{x}$ 的线性函数或非线性函数。二阶控制系统又可以用下列一阶微分方程组表示

$$\frac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t}=f_1(x_1,x_2),\ \frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}t}=f_2(x_1,x_2)$$

式中 f_1 和 f_2 分别为变量 x_1 和 x_2 的线性函数或非线性函数。

若取 $x_1=x$，$x_2=\dot{x}$，则相平面就是 $x-\dot{x}$ 平面。

相轨迹作图方法如下：例如系统的方程为 $\ddot{x}+\dot{x}+x=0$，图 1 示其一条相轨迹 $ABCDE\cdots O$，其起始点为 A。对应于另外的起始点，有另外的相轨迹。从一阶微分方程组消去变量 t，得 $\frac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}x_1}=\frac{f_2(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)}$，这个关于 x_2 和 x_1 的微分方程，给出了相轨迹上点（x_1，x_2）处切线的斜率。多条相轨迹的等斜率点的连线，叫做等倾线，以 $\alpha=$常量表示。在图 1 上，在等倾线 $\alpha=-1$ 和 $\alpha=-1.2$ 之间，相轨迹的平均斜率为 -1.1，从点 A 画斜率为 -1.1 的直线与等倾线 $\alpha=-1.2$ 相交于点 B，则直线段 AB 就近似地为相轨迹的一部分。再从点 B 画斜率为 -1.3 的直线，与等倾线 $\alpha=-1.4$ 相交于点 C。这样依次逐段作图，得曲线 $ABCDE\cdots O$，这就

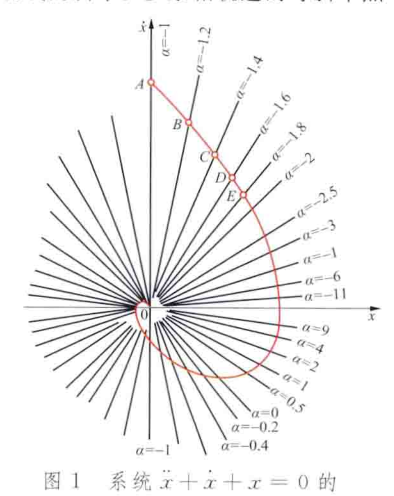


图 1　系统 $\ddot{x}+\dot{x}+x=0$ 的相平面图

是所求的相轨迹。这种作图方法称为等倾线法。

在相平面上，同时有 $f_1(x_1,x_2)=0$ 和 $f_2(x_1,x_2)=0$ 的点 (x_1,x_2) 称为奇点，也称平衡点。相平面上奇点以外的任何其他点则称为普通点。

设原点是奇点，则 $f_1(0,0)=0$，$f_2(0,0)=0$。将 f_1 和 f_2 在原点附近展开成泰勒级数，忽略二次方及更高次方的项，有 $dx_1/dt=a_1x_1+b_1x_2$，$dx_2/dt=a_2x_1+b_2x_2$。令 $x=x_1$，$x_2=\frac{1}{b_1}(-a_1x+\dot{x})$，则有 $\ddot{x}+a\dot{x}+bx=0$，式中 $a=-a_1-b_2$，$b=a_1b_2-a_2b_1$。上一方程的解的性质，取决于特征方程 $\lambda^2+a\lambda+b=0$ 的两个根 λ_1 和 λ_2，这里 a 和 b 为常量，$b\neq0$。奇点有以下六种情况（见图 2）：

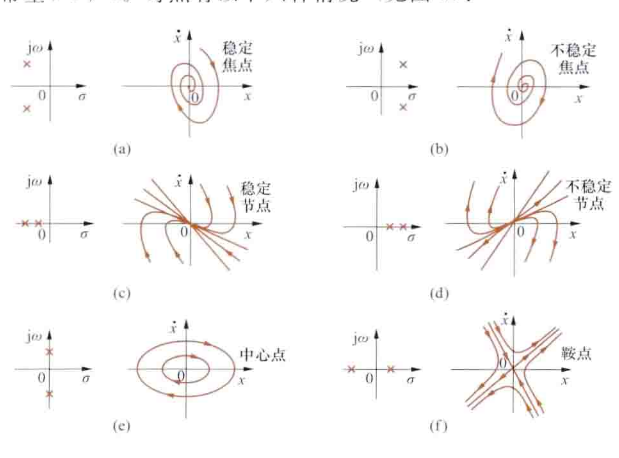


图 2 奇点

(a) 稳定焦点；(b) 不稳定焦点；(c) 稳定节点；(d) 不稳定节点；(e) 中心点；(f) 鞍点

(1) λ_1 和 λ_2 为共轭复数，位于左半平面，奇点为稳定焦点。

(2) λ_1 和 λ_2 为共轭复数，位于右半平面，奇点为不稳定焦点。

(3) λ_1 和 λ_2 为实数，位于左半平面，奇点为稳定节点。

(4) λ_1 和 λ_2 为实数，位于右半平面，奇点为不稳定节点。

(5) λ_1 和 λ_2 为共轭复数，位于 $j\omega$ 轴上，奇点为中心点。

(6) λ_1 和 λ_2 为实数，左半平面和右半平面各有一个，奇点为鞍点。

在相平面图上，可能有极限环。

表述二阶系统的一阶微分方程组的孤立的周期解称为这一方程组的极限环。极限环在相平面中具有特殊的几何图形，是一个孤立的封闭轨迹。极限环表示稳态振荡。极限环将相平面分隔成内部平面和外部平面，极限环内部的相轨迹，不能穿过极限环而进入它的外部，反之亦然。

图 3 是极限环和典型的 x-t 曲线。若起始于极限环外部或内部的（在极限环附近的）相轨迹都盘旋逼近于该极限环，则称为稳定极限环，在这种情况下，系统表现为等幅持续振荡，如图 3（a）所示。若极限环附近的相轨迹是从极限环发散出去的，则该极限环称为不稳定极限环，如图 3（b）所示。若起始于极限环外部各点的（在极限环附近的）相轨迹，从极限环发散出去，而起始于极限环内部各点的相轨迹盘旋逼近于极限环，如图 3（c）所示，或者相反，如图 3（d）所示，则称为半稳定极限环。

举一个应用相平面法分析非线性系统的例子。系统的方程为 $\ddot{x}+0.5\dot{x}+2x+x^2=0$，奇点为 $x=0$，$\dot{x}=0$ 和 $x=-2$，$\dot{x}=0$，这是因为 $\frac{d\dot{x}}{dx}=\frac{d\dot{x}/dt}{dx/dt}=\frac{\ddot{x}}{\dot{x}}=\frac{-0.5\dot{x}-2x-x^2}{\dot{x}}$。

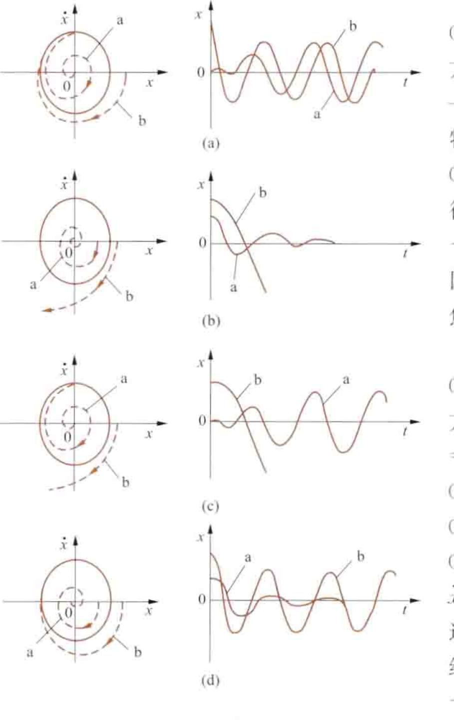


图 3 极限环和典型的 x-t 曲线

(a) 稳定极限环；(b) 不稳定极限环；(c)、(d) 半稳定极限环

在奇点（0，0）附近，系统的方程可线性化为 $\ddot{x}+0.5\dot{x}+2x=0$，特征方程为 $\lambda^2+0.5\lambda+2=0$，特征方程的根为 $-0.25\pm j1.39$，因此原点是稳定焦点。

在奇点（−2，0）附近，系统的方程可改写，令 $y=x+2$，得 $\ddot{y}+0.5\dot{y}-2y+y^2=0$，在 $y=0$、$\dot{y}=0$（即 $x=-2$，$\dot{x}=0$）这一点附近，系统的方程经线性化变为 $\ddot{y}+0.5\dot{y}-2y=0$，其特征方程为 $\mu^2+0.5\mu-2=0$，特征方程的根为 1.19 和 −1.69，因而奇点（−2，0）是鞍点。

用等倾线法，可以做出相平面图，如图 4 所示。穿过鞍点（−2，0）的画有阴影线的相轨迹是分隔线。它将相平面划分为两个区：若初始点在阴影线范围内，相轨迹将盘旋逼近于原点；若在阴影线范围以外，相轨迹将趋于无穷远，不能稳定工作。

再举一个相平面图中有极限环的例子。这是 $\varepsilon=1$ 情况下的凡·德尔·玻尔（Van der Pol）方程 $\ddot{x}-\varepsilon(1-x^2)\dot{x}+x=0$。$\frac{d\dot{x}}{dx}=\frac{d\dot{x}/dt}{dx/dt}=\frac{\ddot{x}}{\dot{x}}=\frac{(1-x^2)\dot{x}-x}{\dot{x}}=(1-x^2)-\frac{x}{\dot{x}}$，等倾线的方程为 $\alpha=(1-x^2)-\frac{x}{\dot{x}}$。相平面图如图 5 所示。

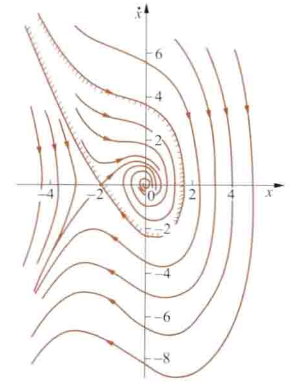


图 4 系统 $\ddot{x}+0.5\dot{x}+2x+x^2=0$ 的相平面图

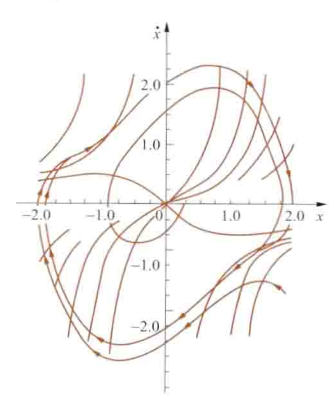


图 5 凡·德尔·玻尔方程的相平面图

图上有极限环，相轨迹从里面或外面盘旋逼近这个稳定极限环。这个稳定极限环表征着持续的自激振荡。

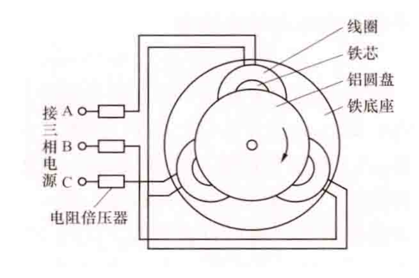
xiangwei

相位 (phase) 见正弦电流。

xiangxu zhishiqi

相序指示器 (phase sequence indicator) 指示正弦三相交流电源各相电压或电流达到最大值先后顺序的仪表。

相序指示器有感应式、移相式等多种，其中感应式的结构和接线如图所示。三个带铁芯的线圈相隔 120°固定在铁底座上，连接成星形电路。当通入三相电流时产生旋转磁场，推动铝圆盘旋转。铝圆盘旋转方向与其上箭头所示方向相同时，表示为正或顺相序，即次序是 A-B-C；反向旋转时，则为负或逆相序，次序是 C-B-A。



感应式相序指示器的原理结构及接线

xiangjiao

橡胶 (rubber) 一种具有良好伸长率、弹性和韧性的有机高分子物质。橡胶分天然橡胶和合成橡胶两大类。

天然橡胶的来源是橡胶树和橡胶草，其主要成分是顺式-1.4 聚异戊二烯，属于非极性橡胶。合成橡胶大多由单体经聚合反应合成，原材料易得，可大规模生产，其产量比天然橡胶高许多倍。合成橡胶按极性可分为两大类：①非极性合成橡胶，主要有丁苯（单体是丁二烯和苯乙烯）、丁基（单体是异丁烯和异戊二烯）、乙丙（单体是乙烯和丙烯）、三元乙丙（单体是乙烯、丙烯和双环戊二烯）、顺丁（单体是丁二烯）、异戊（单体是异戊二烯）等橡胶和硅橡胶。②极性合成橡胶，有氯丁（单体是 2-氯-丁二烯）、丁腈（单体是丁二烯和丙烯腈）、氯磺化聚乙烯（用聚乙烯和 Cl_2、SO_2 合成）、氯化聚醚（用聚乙烯和 Cl_2 合成）、氯醚等橡胶和氟橡胶、聚氨酯橡胶等。非极性橡胶主要用作电线电缆绝缘；极性橡胶主要用于电缆护套。

橡胶在电线电缆工业中应用广泛，如用于制作软线、照明线、矿用电缆、油井电缆、X 光电缆、地质勘探电线、船用电缆和航空电线等。用于不同电缆时，对橡胶性能要求也有一定差异。硅橡胶还可以用作电机绝缘、合成绝缘子伞裙和电器、电子元件的整体包封材料。橡胶的膜压制品、橡胶带和热收缩管等在电工中亦广泛应用。多数橡胶因性能一般，应用面广而称为通用橡胶，如丁苯橡胶、顺丁橡胶、天然橡胶等。合成橡胶中具有某些优异性能（耐油性、耐化学性、耐热性、耐寒性、耐透气性、耐磨性等）的，称为特种橡胶。如硅橡胶具有优良的耐热性，故又称耐热橡胶；丁腈橡胶具有优异的耐油性，又称耐油橡胶。除热塑性橡胶以外的大部分橡胶制品都是指已“硫化”（交联）的橡胶（又称橡皮）。凡是由橡树胶乳加工得到的干胶和合成橡胶厂生产的各种合成橡胶统称为生胶。大多数生胶受热易变软发黏，机械强度低，需经硫化处理后才有实用价值。硫化是指生胶与硫化剂及其他配合剂均匀地混合后，在一定温度和压力下使原来线形橡胶分子变成网状分子的过程。为了改善橡胶性能，在硫化之前必须加入各种配合剂，包括促进剂、防老剂、补强剂、硫化剂、增塑剂（或软化剂）、填料等，然后在混橡机上进行混炼。热塑性橡胶是在常温下呈现出和硫化橡胶类似的特性而不需硫化的橡胶。商品热塑性橡胶有聚氨酯橡胶、乙烯-丙烯共聚物、苯乙烯-丁二烯共聚物等。热塑性橡胶的优点是具有热塑性，只要将它加热到熔点以上，即可用挤出法或模压法等加工成型，主要用于制作绝缘衬垫和低压绝缘电线等。热塑性聚氨酯还可以用作封装料和紧缩套等。

Xiaoteji erjiguan

肖特基二极管 (Schottky diode) 由具有整流作用的金属-半导体结组成的半导体二极管。当肖特基二极管处于正向偏置时，其载流子流向金属边，使多数载流子仍保持在大于金属中的费米能量的某种能级上，从而产生热载流子，故又称其为热载流子二极管。它的特点是存储电荷效应极微，所以开关时间很短，为皮秒（ps）数量级。另一特点是门坎电压小，仅 0.3V 左右。

肖特基二极管常用作检波器，取其低噪声和较好的转换效率等优点，因而它具有较高的整体检测灵敏度。在数字集成电路中，它常与半导体三极管制造在一起，形成肖特基三极管，从而提高开关速度。图示是肖特基二极管的图形符号。

a
k

肖特基二极管的图形符号

xiaobo bianhuan

小波变换 (wavelet transform) 应用尺度参数与平移参数都可变的小波函数族来处理信号的一种变换。小波（又称子波）函数 $\psi(t)$ 有以下性质：$\int_{-\infty}^{\infty}\psi(t)\mathrm{d}t=0$ 即平均值为零；而且具有紧支集或接近紧支集。“紧支集”指在区间 $[t_1, t_2]$ 以外，函数$\psi(t)=0$。“接近紧支集”可理解为在此区间外，$\psi(t)$之值可忽略不计。平均值为零，则函数值有正有负，呈波动形；在有限时间内波形正负起伏，这便是“小波”得名的由来。图 1 表示函数 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 中参数 b 可以控制小波在时间轴上平移，但波形不变。图 2 表示参数 a 可以控制小波的尺度，a 大时，小波伸开；a 小时，小波缩拢。用这种具有伸缩和平移性质的小波函数族的组合来逼近原始信号，即小波变换。

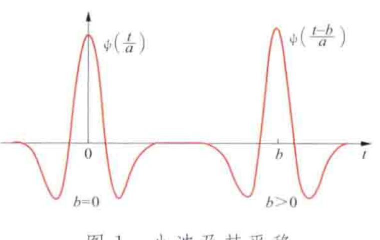


图 1 小波及其平移

小波变换是在傅里叶变换的基础上发展起来的。傅里叶变换被广泛地用来处理信号，它的缺点是：变换结果反映的

是信号在全时间轴上的总体频域特性，不能反映其某一时段的局部特性。因此后来发展出加窗傅里叶变换。窗 $g(t-b)$ 是类似钟形的有紧支集或接近紧支集的函数，它可以通过改变 b 在时间轴上平移。$f(t)$ 与 $g(t-b)$ 相乘后再作傅里叶变换就是加窗傅里叶变换。窗以外，$g(t-b)=0$，从而 $f(t)g(t-b)=0$，可见窗以外的 $f(t)$ 不参加变换，因而突出了信号局部时段的频域特性。加窗傅里叶变换的不足是窗宽不能改变，小波变换克服了此缺点。

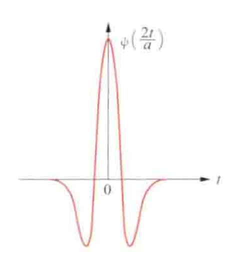


图 2　图 1 中 $b=0$，a 减小到一半时的小波

小波变换分连续小波变换和离散小波变换。

连续小波变换　设有小波函数 $\psi(t)$。设信号 $f(t)$ 和小波 $\psi(t)$ 都是平方可积函数，并且 $\psi(t)$ 的傅里叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足

$$C=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty$$

连续小波变换定义为

$$W_f(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t$$

式中 ψ^* 代表 ψ 的共轭。反变换是

$$f(t)=\frac{1}{C}\int_0^{\infty}\frac{\mathrm{d}a}{a^2}\int_{-\infty}^{\infty}W_f(a,b)\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}b$$

连续小波变换的离散化：令实数 $a_0>0$，$b_0>0$，$a=a_0^m$，$\frac{b}{a}=nb_0$。则上面的变换公式中的 $|a|^{-\frac{1}{2}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 可改记作

$$\psi_{m,n}(t)=a_0^{-\frac{m}{2}}\psi(a_0^{-m}t-nb_0)$$

变换公式改记为

$$W_f(m,n)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\,a_0^{-\frac{m}{2}}\psi^*(a_0^{-m}t-nb_0)\mathrm{d}t$$

两个函数 $f(t)$ 与 $g(t)$ 的内积定义为 $\langle f(t),g(t)\rangle\overset{\text{def}}{=\!=}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\,g(t)^*\,\mathrm{d}t$，因此 $\|f(t)\|^2\overset{\text{def}}{=\!=}\langle f(t),f(t)\rangle$。如此，变换公式可简记为

$$W_f(m,n)=\langle f(t),\psi_{m,n}(t)\rangle$$

对于任意平方可积函数 $f(t)$，如果存在正常数 A 和 B，使下式成立

$$A\|f(t)\|^2\leqslant\sum_m\sum_n|\langle f(t),\zeta_{m,n}(t)\rangle|^2\leqslant B\|f(t)\|^2$$

则称 $\{\zeta_{m,n}(t)\mid m,n\in Z\}$ 为标架，其中，Z 代表整数集合。如果小波系列 $\{\psi_{m,n}(t)\mid m,n\in Z\}$ 是标架，由标架理论，存在对偶标架 $\{\tilde{\psi}_{m,n}(t)\mid m,n\in Z\}$，重构公式（即反变换公式）为

$$f(t)=\sum_m\sum_n\langle f(t),\psi_{m,n}(t)\rangle\tilde{\psi}_{m,n}(t)$$

如果 $A\approx B$，则有一阶近似关系

$$f(t)\approx\frac{2}{A+B}\sum_m\sum_n\langle f(t),\psi_{m,n}(t)\rangle\psi_{m,n}(t)$$

离散小波变换　连续小波变换离散化后的变换公式，就是离散小波变换，一般是非正交小波变换。由多尺度分析可得到正交离散小波变换。函数 $f(t)$ 和 $g(t)$ 正交，是指它们的内积为零，即

$$\langle f(t),g(t)\rangle=0,f(t)\neq g(t)$$

尺度函数及其伸缩平移系　多尺度分析中的尺度函数 $\varphi(t)$ 规定为平方可积函数，并且有 $\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(t)\mathrm{d}t=1$。由 $\varphi(t)$ 可形成它的伸缩平移系

$$\varphi_{j,n}(t)=2^{-j/2}\varphi(2^{-j}t-n),\ j、n\in Z$$

$\varphi(t)$ 即 $\varphi_{0,0}(t)$。在 $\varphi_{j,n}(t)$ 中，2^{-j} 控制伸缩，n 控制平移。j 每增加 1，函数的宽度增加一倍，而函数值减小到原来的 $1/\sqrt{2}$，这样则有下式

$$\langle\varphi_{j,n}(t),\varphi_{j,n}(t)\rangle=1$$

平移正交性由下式体现

$$\langle\varphi_{j,n}(t),\varphi_{j,m}(t)\rangle=0,\ m\neq n$$

由 $\{\varphi_{j,n}\mid n\in Z\}$ 和它们的线性组合构成的集合，记作 V_j，即 $\{\varphi_{j,n}\mid n\in Z\}$ 是 V_j 的规范正交基。根据多尺度分析，V_j 有以下性质：V_j 中的任一函数可由 V_{j-1} 中的函数线性表出；V_j 是 V_{j-1} 的一部分，另一部分记作 W_j；任一平方可积函数，都可以由所有 $V_j(j\in Z)$ 中的函数的线性组合来逼近；V_∞ 中只有一个元素“0”。例如，用哈尔（Haar）函数 $h(t)$（图 3）充当 $\varphi_{0,0}(t)$。图中画出了 $\varphi_{0,0}(t)=h(t)$ 和 $\varphi_{0,2}(t)=h(t-2)$。它们的乘积为零，因此它们是正交的。图 4 中画出了 $\varphi_{-1,0}(t)=\sqrt{2}\,h(2t)$ 和 $\varphi_{-1,1}(t)=\sqrt{2}h(2t-1)$，它们也正交。由图看出，$\varphi_{0,0}(t)=(1/\sqrt{2})\times[\varphi_{-1,0}(t)+\varphi_{-1,1}(t)]$，可见属于 V_0 中的函数 $\varphi_{0,0}(t)$ 可以由 V_{-1} 中的函数线性表示。

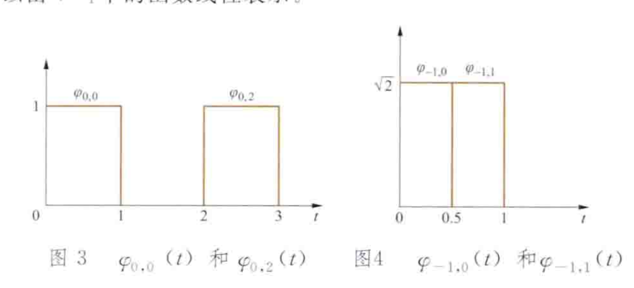


图 3　$\varphi_{0,0}(t)$ 和 $\varphi_{0,2}(t)$　　图4　$\varphi_{-1,0}(t)$ 和 $\varphi_{-1,1}(t)$

小波函数及其伸缩平移系　由尺度函数可以构造出小波函数 ψ 及其伸缩平移系如下

$$\psi_{j,n}(t)=2^{-j/2}\psi(2^{-j}t-n)$$

而且

$$\int_{-\infty}^{\infty}\psi_{j,n}(t)\mathrm{d}t=0$$

$$\langle\psi_{j,n}(t),\psi_{j,m}(t)\rangle=\begin{cases}1,m=n\\0,m\neq n\end{cases}$$

$\psi(t)$ 即 $\psi_{0,0}(t)$。$\psi(t)$ 称母小波。实际上，$\{\psi_{j,n}(t)|n\in Z\}$ 就是前面提到的 W_j 的规范正交基。此外 $\varphi_{j,n}(t)$ 和 $\psi_{j,m}(t)$ 正交：$\langle\varphi_{j,n}(t),\psi_{j,m}(t)\rangle=0$。哈尔小波的 $\psi_{0,0}(t)$ 和 $\psi_{0,2}(t)$ 的波形画在图 5 中，显然，它们正交；而且它们也和图 3 中的函数正交。

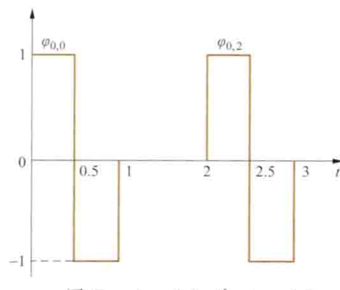


图 5　$\psi_{0,0}(t)$ 和 $\psi_{0,2}(t)$

函数作小波分解的

原理　尺度函数类似低通滤波器，小波函数类似高通滤波器，它们共同作用于信号，把信号的高频和低频分别滤出来。函数由小波表示的分解过程如下。

第一步，把平方可积函数 $f(t)$ 分解为 V_j 中的$\varphi_{j,n}(t)$ 的线性组合和 W_j 中的小波$\psi_{j,n}(t)$ 的线性组合之和，即

$$f(t)=\sum_n A_{j,n}\varphi_{j,n}(t)+\sum_n B_{j,n}\psi_{j,n}(t)=d_j+g_j$$

式中各系数为

$$A_{j,n}=\langle f(t),\varphi_{j,n}(t)\rangle,B_{j,n}=\langle f(t),\psi_{j,n}(t)\rangle$$

d_j 为φ_j，$\varphi_{j,n}$平移系表示的低频分量，g_j 为小波$\psi_{j,n}$平移系表示的高频分量。

第二步，d_j 属于V_j，而 V_{j+1} 和 W_{j+1} 一起构成 V_j，因此，d_j 也可分解为

$$d_j=d_{j+1}+g_{j+1}$$

如此，一直分解到d_p 和 g_p 为止。如果第一步里 $f(t)$ 在合适的 V_j 和 W_j 中分解，即在合适的 V_{j-1} 中分解，将上面过程反过来，就能把 $f(t)$ 较好地恢复出来。

应用举例　下面以局部放电脉冲小波分解的仿真和故障行波的小波分解作为小波变换在电力系统中的应用举例。

（1）局部放电脉冲小波分解的仿真。图 6 中的局部放电脉冲（$j=0$ 的图）里混杂有干扰。应用 Daubechies 小波（法国数学家 Daubechies 设计的小波），经过 4 级分解，可将位于 200μs 处的放电脉冲滤出。

（2）故障行波的小波分解。图 7 示出了一发生 A 相接地故障的 500kV 输电线路 MN 连接图，图中 F 是故障点。故障时，A 相电压初相角为 45°，过渡电阻为 50Ω。故障行波的主要特征包括行波到达检测点的时间、行波在不同频带下的含量（大小）和行波变化的极性。

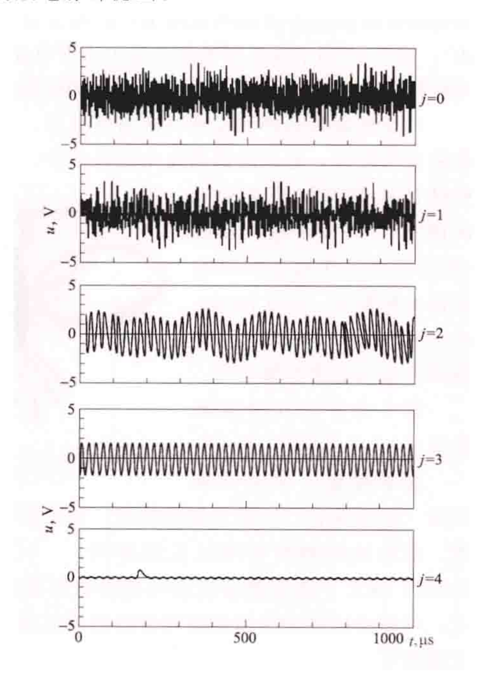


图 6　放电脉冲小波分解的仿真

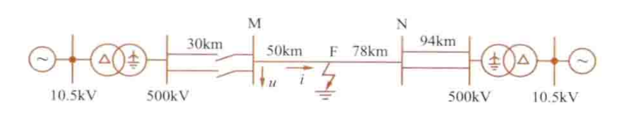


图 7　500kV 三相输电线路

图 8 示出了线路 MN 在 M 端母线处的三相电压波形、A 相电压行波的小波变换和小波变换模极大值，变换只进行了 4 次，采样频率 1MHz。

由图 8 可见，对应于故障行波到达检测点，小波变换出现模极大值（① ② ③ ④ ①′②′等），突变点和行波到达母线检测点的时刻一致；不同尺度下的小波变换模极大值（M_1、M_2、M_3、M_4）反映了在不同频带（尺度）下行波分量的大小和位置关系，它明确表达了行波的频率特性；小波变换模极大值的极性和行波突变的方向一致。显然，行波的小波变换表示，特别是它的模极大值表示非常简洁地刻画了行波故障特征，便于行波检测，也便于构成有效实用的行波保护、行波测距算法。

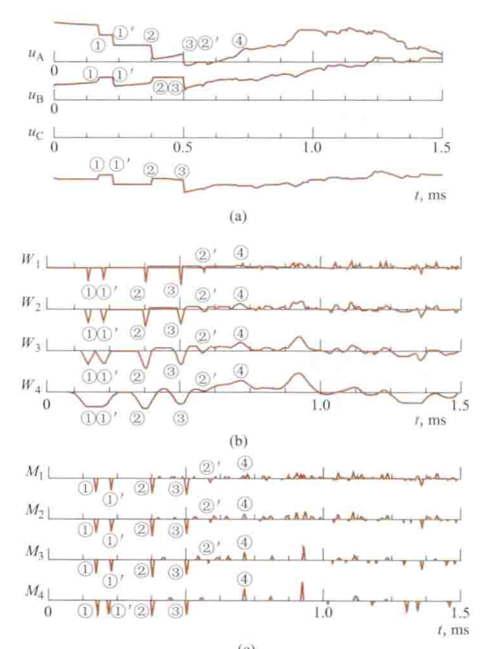


图 8　三相电压波形和 A 相电压的小波变换
（a）三相电压行波；（b）A 相电压在四尺度 2^1，2^2，2^3，2^4 下的小波变换 W_1、W_2、W_3 和 W_4；（c）A 相电压在对应尺度下的小波变换模极大值 M_1、M_2、M_3和 M_4

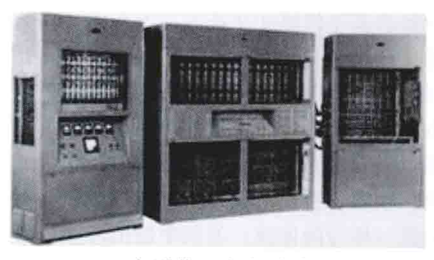
xiaoxing jisuanji

小型计算机

（minicomputer）　一种与大型计算机相比，字长较短、速度较低、系统规模较小的计算机。小型计算机广泛用于科学计算、事务处理和过程控制等领域。

早期的计算机受器件的限制，系统庞大，价格昂贵，一般用户难以承受。20 世纪 60 年代中期，美国 DEC 公司首先推出 12 位字长的 PDP-8 型小型计算机。70 年代初又推出的 16 位字长的 PDP-11 和 NOVA 系列机曾风行一时，成为主流机种。80 年代初推出的小型计算机，字长是 32 位，性能价格比高，目标是向上增强性能，争夺大型计算机市场。小型计算机制造厂美国有 IBM、HP 等。中国先后推出了 DJS-100、200 系列和 DJS-1000、2000 系列小型计算机。图示为 DJS-103 机。

20 世纪 90 年代超级小型计算机的处理能力和配置大致如下：字长和数据通道宽度至少 64 位；主存几百兆字节以上；处理速度数百个 MIPS（million instructions per second，MIPS）以上；支持数百千兆字节至几亿字节磁盘容量；连接 32～512 个终端用户。


中国第一台小型通用电子管计算机—103 机

小型计算机采用标准化的硬件和软件结构，向开放系统发展；在系统结构上采用高速缓冲存储器、流水线技术提高处理机速度；采用多处理机并行处理技术和容错技术；向Unix操作系统靠拢，提供系统软件和支撑软件的兼容性；支持IEEE802局域网和FDDI高速光纤网标准的网络适配器。

小型计算机已用于较大型的科学、工程计算，企业、事业的较大型的综合管理信息系统、计算机辅助设计、计算机网络的网控中心等。

xiebo celiang yibiao

谐波测量仪表 (harmonic measuring meter) 测量电路中尤其是供电系统中谐波电压、谐波电流和谐波有功功率等参量的仪表。固定安装于现场的此类仪表，通常又称为在线式谐波监测装置。

与频谱分析仪不同，谐波测量仪表是参照被测信号的基波频率进行的，通常仅给出所关注频率范围（一般是50～2000Hz）内信号频谱的一些特定谱线（基波50Hz以及50Hz整数倍处可能有的谱线）。早期的谐波测量仪表也曾称为谐波分析仪。

类型 谐波测量仪表分模拟式和数字式两大类。

模拟式谐波测量仪表 早期的谐波测量仪表是模拟式的，采用模拟滤波方法分离和测量被测信号中各次谐波频率的分量。可分为一次只测一个特定谐波分量和一次同时测量多个谐波分量两类。图1给出了一次同时测量多个谐波分量的模拟式谐波测量仪表的原理框图。被测电压或电流信号经输入级（一般为电压互感器或电流互感器）调整后，加到多个并联的带通滤波器的输入端（每个滤波器的带通中心频率不同，且可调节，以便能覆盖整个被关注的频率范围），滤波器输出信号经检测放大后，可同时得到多个谐波分量的幅值。而一次只测某次特定谐波分量的实现方案，只需一个滤波器，通过改变滤波器的中心频率测得所需的（但非同时）谐波分量。

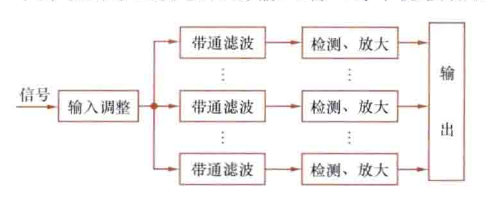


图1 模拟式谐波测量仪表原理框图

模拟式的谐波测量仪表结构简单，准确度较低，一般只能测出各次谐波的幅值，不能很好地反映被测信号中各次谐波分量间的相互关系，因而不适用于不断变化的非稳定信号中谐波的测量。

数字式谐波测量仪表 模拟式的谐波测量仪表已基本被数字式谐波测量仪表所取代。

数字式谐波测量仪表基于傅里叶变换原理而构建，具体实现的算法是快速傅里叶变换（FFT）（见动态电路频域分析）。严格意义上，傅里叶变换只对稳态信号能得出精确结果，但供电系统的电压和负荷电流等均随时间变化，导致其中的功率、基波功率以及谐波水平等也都波动变化。电压、电流幅值的波动，使工频的整数次谐波分量的能量泄漏至相邻的非工频整数次谐波（称为间谐波）的频率范围内，从而影响傅里叶变换算法的准确性。为准确测量并评估供电系统电压、电流的谐波水平，就要采用特殊的FFT算法，且应采用统一的标准。对50Hz供电系统电压、电流等参量的测量，时间窗须确定为10个周期；对约5Hz分辨率的频谱计算结果，要采用规定的一种谱线组合（该谱线组合也称“谐波子组”或“子组”）的方法计算谐波和间谐波，然后，对10个周期的谐波及间谐波子组做平均处理，得出3s和10min的谐波值。谐波测量仪表的3s谐波值测量结果，反映的是“非常短时间”的谐波干扰效果；10min谐波值测量结果，则体现“短时间”电气设备的谐波热效应。

数字式谐波测量仪表的原理结构如图2所示。信号的采样频率不能预先确定且不变，必须跟踪被测供电系统的工频频率，并与之同步。按谐波发射水平的评估要求，谐波测量仪器有四级输出：输出1为离散傅里叶变换（DFT）的频谱分析结果；输出2a用于供电系统谐波及间谐波的评估（A级仪器的谐波及间谐波测量结果，必须为子组算法的直接输出）；输出2b用于低压用电设备输出谐波电流的评估；输出3为检验测量结果是否符合相关标准限值的结论性输出。

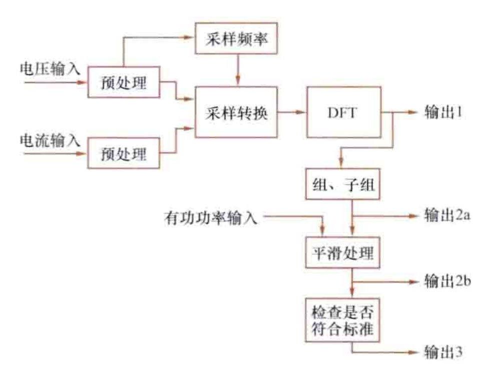


图2 数字式谐波测量仪表的原理结构框图

可根据需要选择和设定各次谐波电压、电流、功率等参数的监测限值，超过限值则发出报警信号。一般可由软件选择谐波次数（如第2～50次谐波），并设定相应限值（所选定谐波次数范围内的总谐波畸变率 total harmonic distortion，THD），经仪器硬件接口输出报警信号。

图3为手持式谐波测量仪。



图3 手持式谐波测量仪

校准检定 中国国家标准《电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则》（GB/T 17626.7—2008），规定了谐波测量仪表的校准检定方法和测量不确定度，可利用标准谐波信号源对谐波测量仪器进行型式试验和定期检定。

数字式谐波测量仪表功能强大，除可测量谐波电压、谐波电流、谐波有功功率外，还可测量谐波有功功率、谐波无功功率、谐波视在功率及功率因数等参量；且测量速度快，准确度高，自动化程度高，使用方便，可联网，成为网络化电能质量监测系统中一种重要的测量仪表。

图4所示为电能质量在线监测系统。



图4 TD5100电能质量在线监测系统

xiebo dianliu

谐波电流 (harmonic current) 将非正弦周期性电流函数按傅里叶级数展开时，其频率为原周期电流频率整数倍的各正弦分量的统称。频率等于原周期电流频率 k 倍的谐波电流称为 k 次谐波电流，k 大于 1 的各谐波电流也统称为高次谐波电流。（见非正弦周期电流电路）

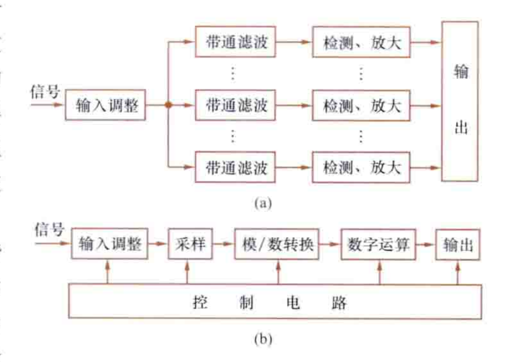
xiebo fenxiyi

谐波分析仪 (harmonic analyzer) 测量非正弦电压、电流中各次谐波幅值、相角以及有功功率、无功功率等参量的仪器。

与频谱分析仪不同，谐波分析仪的测量是参照被测信号的基波频率进行的，通常仅给出所关注频率范围（一般是 50～2000Hz）内信号频谱的一些特定谱线（即信号频谱中基波 50Hz 以及 50Hz 整数倍处可能有的谱线）。

谐波分析仪分为模拟式和数字式两种。

模拟式谐波分析仪 用模拟滤波方法分离和测量被测信号中各次谐波频率分量的仪表。可分为一次只测一个特定谐波分量和一次同时测量多个谐波分量两类。图（a）给出了一次同时测量多个谐波分量的谐波分析仪原理框图。被测电压或电流信号经输入级（一般为电压互感器或电流互感器）调整后，加到多个并联的带通滤波器的输入端（每个滤波器的带通中心频率不同，且可调节，以便能覆盖整个被关注的频率范围），滤波器输出信号经检测放大后，可同时得到多个谐波分量的幅值。而一次只测一个特定谐波分量的实现方案，只需一个滤波器，通过改变滤波器的中心频率，得到所需的（但非同时）谐波成分谱线。



谐波分析仪原理框图
(a) 模拟式；(b) 数字式

模拟式谐波分析仪结构较简单，准确度较低，一般只能求出各次谐波的幅值，不能很好地反映谐波间的相互关系，因而不适用于具有不断变化的非稳定信号的谐波测量。

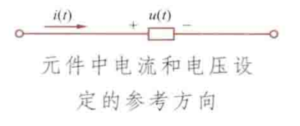
数字式谐波分析仪 采用模数转换，经数字运算给出结果的谐波分析仪。其工作原理为：首先对被测信号进行采样，然后将其转换成数字化的采样数据，如果 N 个采样数据均匀分布在被测信号的一个周期上，且满足 $N>2M$（M 为被测信号最高次谐波成分的次数），则依据这 N 个采样数据，理论上能准确求出被测信号中各次谐波的幅值和初相角，其原理框图见图（b）。数字式谐波分析仪大多采用计算机控制整个仪器各功能单元的协调工作，并完成数字运算；高级的还带有各种接口和多种输出装置（打印、显示、图像等）。数字运算一般采用快速傅里叶变换（FFT）（见动态电路频域分析），可同时快速分析出各次谐波分量的幅值、初相角以及谐波有功功率和无功功率等。数字式谐波分析仪的优点是功能较全面，除可测量谐波电压、谐波电流、谐波功率外，还可测量谐波有功功率、谐波无功功率、谐波视在功率及功率因数等参量；测量速度快，准确度高，自动化程度高，使用方便。数字式谐波分析仪已被广泛采用，并已基本取代模拟式谐波分析仪。

xiebo gonglü

谐波功率 (harmonic power) 同频率的谐波电流和电压构成的功率。当二端元件的电流 $i(t)$ 和电压 $u(t)$ 设定的参考方向如图所示，而且它们都是同周期的非正弦波形时，若将电流和电压的非正弦周期波形分别分解成傅里叶级数，将直流分量和基波分别当作零次和一次谐波看待，设 U_n 和 I_n 分别是第 n 次谐波电压和电流的有效值，φ_n 是第 n 次谐波电流滞后于第 n 次谐波电压的相位差角，并规定 $\varphi_0=0$，则第 n 次谐波的有功功率 P_n 为

$$P_n=U_n I_n\cos\varphi_n,\ n=0,\ 1,\ 2,\ \cdots$$

P_0 为直流分量的有功功率，P_1 为基波的有功功率。含有谐波源用户的有功功率 P 可能小于基波的有功功率 P_1，这时将有一部分谐波功率为负值，即负荷发出一部分谐波功率并将它反馈回电力网。这部分谐波功率可能使其他用户受到谐波污染。与此类似，第 n 次谐波的无功功率 Q_n 为



元件中电流和电压设定的参考方向

$$Q_n=U_n I_n\sin\varphi_n, n=0,1,2,\cdots$$

第 n 次谐波的视在功率 S_n 为

$$S_n=U_n I_n, n=0,1,2,\cdots$$

第 n 次谐波的复功率为

$$P_n+jQ_n（或\ P_n-jQ_n）$$

xiezhen

谐振 (resonance) 在某个频率的正弦电源激励下，含电阻、电感、电容和线性受控源的二端网络端子上的电压和与之成关联方向的电流同相位的状态。谐振时正弦电源的频率 f_0（或角频率 ω_0）称作电路的谐振频率（或谐振角频率）。电路的谐振是通过电压、电流的相位来定义的，故又称相位谐振。谐振分电压谐振和电流谐振。

电压谐振 又称串联谐振。谐振时，二端网络内相串联的两个子网络的无功电压分量相互抵消。最简单的谐振电路由电阻 R、电感 L 和电容 C 串联构成，并由电压源（其电压相量为 $\underline{U}_S$）激励，如图 1 所示。当电源的频率等于电路

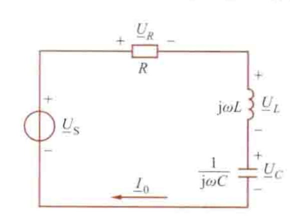


图 1 RLC 串联谐振电路

的谐振频率 $f_0=1/(2\pi\sqrt{LC})$（角频率 $\omega_0=1/\sqrt{LC}$）时，电路处于谐振状态。串联的电感电压 $\underline{U}_L$ 和电容电压 $\underline{U}_C$ 相互抵消；电阻电压 $\underline{U}_R$ 等于电源电压 $\underline{U}_S$。各电压相量图见图 2。电路中电流 $\underline{I}_0=\underline{U}_S/R$ 和电源电压同相。感抗 $\omega_0 L$ 和容抗 $1/(\omega_0 C)$ 相等，并以特性阻抗 ρ 来表示，即 $\rho=\omega_0 L=1/(\omega_0 C)$。电感电压和电容电压的有效值相等，$U_L=U_C=QU_S$，其中，$Q\overset{\text{def}}{=\!=}\rho/R$，称作谐振电路的品质因数。

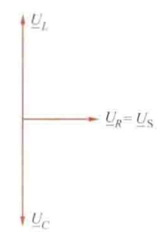


图 2　串联谐振时的电压相量图

$Q>1$时，电感电压、电容电压的有效值大于电源电压的有效值。

谐振曲线　电源电压的有效值不变时，电路响应随电源频率变化的曲线。其中的一种是通用谐振曲线，它的纵坐标是电流 I 和谐振电流 I_0 的比值；横坐标是电源频率 f 和谐振频率 f_0 的比值，记作 $\eta=f/f_0$，并且以品质因数 Q 作为参变量。通用谐振曲线的公式为

$$\frac{I}{I_0}=\frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\eta-\frac{1}{\eta}\right)^2}}$$

其曲线见图 3。谐振时，$\eta=1$，电流最大。品质因数 Q 愈大，曲线愈尖，它表明电源频率 f 稍许离开谐振频率f_0（即 η 稍许偏离 1）时，电流比谐振时电流 I_0 要小得多。这也意味着 Q 大时，只有频率接近于f_0的电源，才在电路中产生较大电流，此时电路呈现低阻抗；在其他频率下，电流很小，电路呈现高阻抗。电路对频率有“选择性”。Q 越大，电路的选频特性越好。

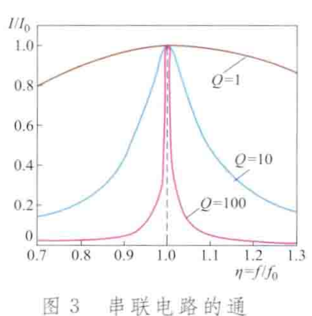


图 3　串联电路的通用谐振曲线

电流谐振　又称并联谐振。谐振时，二端网络内相并联的两个子网络的无功电流分量相互抵消。最简单的电流谐振电路由电阻 R、电感 L 和电容 C 并联构成，由电流源激励，见图 4。电源频率等于电路的谐振频率 $f_0=1/(2\pi\sqrt{LC})$ 时，电路处于谐振状态。谐振时，电感电流 $\dot{I}_L$ 和电容电流 $\dot{I}_C$ 相互抵消，电阻电流 $\dot{I}_R$ 等于电流源电流 $\dot{I}_S$。它们的相量图见图 5。电路的品质因数 $Q\overset{\text{def}}{=\!=}R/\rho$，式中特性阻抗$\rho=\omega_0L=1/(\omega_0C)$。品质因数 Q 大时，只有其频率接近谐振频率 f_0 的电源，才在电路里引起较大电压，此时电路呈现高阻抗；在其他频率下，电压很低，电路呈现低阻抗。Q 越大，电路的选频特性越好。$Q>1$ 时，电感电流、电容电流的有效值大于电源电流的有效值。

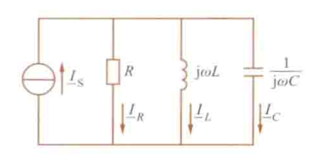


图 4　并联谐振电路

图 5　并联谐振时的电流相量图

混联形式的谐振电路　电阻、电感、电容元件以混联形式构成的谐振电路。这种电路的谐振频率可以不止一个。图 6 所示电路就是其中一例。当电源频率 $f_1=1/[2\pi\sqrt{L(C_1+C_2)}]$ 时，图中用虚线框住的两个串联子电路的电压相互抵消，出现串联谐振，电路呈现低阻抗。当电源频率 $f_2=1/(2\pi\sqrt{LC_2})>f_1$ 时，L 和C_2的并联子电路的电流相互抵消，电路呈现高阻抗。此电路可顺利地让频率是 f_1 的电流流通，阻止频率是 f_2 的电流通过。f_1 和 f_2 是该电路的两个谐振频率。

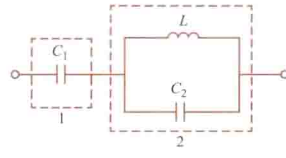


图 6　由电容C_1、C_2和电感 L 组成的谐振电路

谐振现象的应用及危害　谐振现象的应用很广。在电力系统中，有些负载例如电力机车会产生 3 次和高次谐波电流（见非正弦周期电流电路）。为了不使这种电流侵入电网，常在用户端接入滤波器，见图 7。最简单的滤波器是图 1 所示的串联谐振电路。设滤波器在 3 次谐波的频率（150Hz）下谐振，这时它呈现低阻抗。用户产生的 3 次谐波电流基本上沿图 7 中虚线回路流通，不侵入电网。滤波器在工频（50Hz）下呈现高阻抗，工频电流基本上沿图 7 中实线回路流通。一般收音机中的中频放大器也利用了谐振现象，放大器只让中频电压加到它的负载上去。

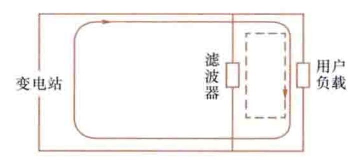


图 7　用户侧接滤波器的电路

当在电路发生谐振时，串联谐振电路的电感（电容）电压可以大于输入电压，并联谐振电路的电感（电容）电流可以大于输入电流，在电力系统中要注意防止谐振时产生的高电压或大电流对设备的破坏作用。

xiezhen dianqiao

谐振电桥　（resonant bridge）　见交流电桥。

xielou dianliu celiang

泄漏电流测量　（leakage current measurement）　为衡量绝缘的导电性，在直流电压作用下，对绝缘中流过的传导电流进行测量。绝缘的导电性是由于其内部存在的各种载流子在电场作用下自由迁移而造成，绝缘中流过的传导电流称为泄漏电流，其值通常是极微小的。电介质受绝缘老化、潮湿或污秽等因素影响，其内部载流子会增多，载流子的迁移率加大，表现出传导电流剧增。因而测定绝缘设备在一定条件下的泄漏电流可作为判断绝缘性能的一种依据。

泄漏电流的测量可在直流耐压时进行，在升压过程中分段读取电流值，根据电压和电流是否呈线性关系，可衡量试品的绝缘状况。测量泄漏电流时施加的电压较高，故检测缺陷的能力比测量绝缘电阻时的要高。

试验时由直流高电压发生器对试品施加所需电压，通常用微安表测电流。它可接在高压侧或低压侧，前者读数和操作不便，后者易受杂散电流影响而造成测量误差。影响试验结果的因素较多，如接线方式、环境条件和试品表面污秽情况等，需采取相应措施。为保证安全，在试验回路中设有试品击穿的快速切断保护装置、微安表并联保护间隙等。

xinhaoliu tu

信号流图　（signal flow diagram）　控制系统中信号传递和变换关系的一种图解描述，是描述系统变量间关系的数学方程的图形表示（控制系统的数学模型表述成以 s 为

变量的代数方程），亦称信号流程图。信号流图的符号简单，绘制容易，运用方便。利用梅森增益公式可以直接从信号流图算出系统的传递函数。由信号流图可以直接画出系统的模拟计算机仿真线路。

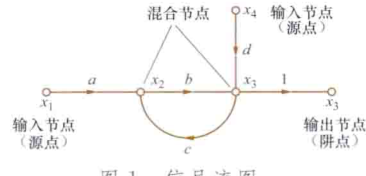


图 1　信号流图

术语　如图 1 所示，有下述术语。

节点：表示变量或信号的点，变量的值记为 $x_i(i=1, 2, \cdots)$。

支路：连接两个节点的定向线段。支路的增益称为传输。传输的值记为 a、b、c、…。

输入节点或源点：只有输出支路的节点。

输出节点或阱点：只有输入支路的节点。

混合节点：既有输入支路，又有输出支路的节点。

通路：沿支路箭头方向而穿过各相连支路的途径称为通路。若通路通过任一节点不多于一次，称为开通路。若通路的终点就是通路的起点，并且通过任何其他节点不多于一次，称为闭通路。

回路增益：回路（就是闭通路）中各支路传输的乘积。

不接触回路：回路之间没有任何公共节点。

前向通路：从输入节点到输出节点的通路，通过任何节点不多于一次。

前向通路增益：前向通路中各支路传输的乘积。

性质

(1) 支路表示了一个信号对另一个信号的函数关系，信号只能沿支路上的箭头方向通过。

(2) 节点可以将所有输入支路的信号总加，并将总和信号传送到所有输出支路。

(3) 由混合节点增加一个具有单位传输的支路，可以增加一个输出节点（如图 1 中 x_3）。

(4) 对于给定的系统，信号流图不是唯一的。

信号流图代数　对应于图 2，有下述规则：

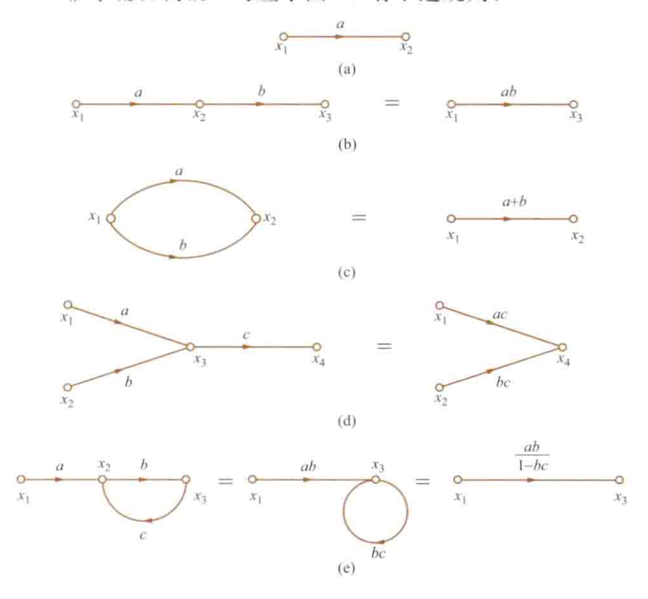


图 2　信号流图代数

(1) 只有一个输入支路的节点的值为 $x_2=ax_1$ [图 2 (a)]。

(2) 串联支路可合并为单一支路 [图 2 (b)]。

(3) 并联支路可合并为单一支路 [图 2 (c)]。

(4) 混合节点可以消掉 [图 2 (d)]。

(5) 回路可以消掉 [图 2 (e)]。因为 $x_3=bx_2$，$x_2=ax_1+cx_3$，所以 $x_3=abx_1+bcx_3$，这就是有 x_3 的自回路。自回路还可以消掉，即有 $x_3=\dfrac{ab}{1-bc}x_1$。

信号流图与框图的对应　图 3 (a) 是一控制系统的框图，图 3 (b) 则是对应的信号流图。

信号流图的化简与框图的化简类似，还可以使用信号流图代数规则。

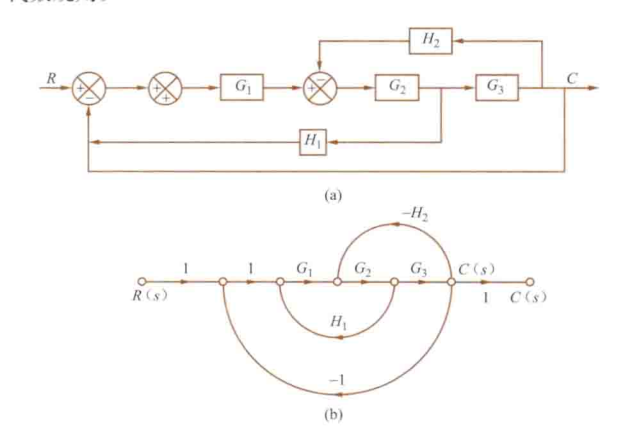


图 3　一个多回路控制系统

(a) 框图；(b) 信号流图

梅森 (S. J. Mason) 增益公式　输入节点与输出节点之间的总传输，可以表示为

$$P=\frac{1}{\Delta}\sum_k P_k\Delta_k$$

式中 P_k 为第 k 条前向通路的通路增益或传输；Δ 为流图的特征式，流图的特征式 $=1-$(所有不同回路的增益之和) $+$(每两个互不接触回路增益乘积之和) $-$(每三个互不接触回路增益乘积之和) $+\cdots=1-\sum\limits_a L_a+\sum\limits_{b,c}L_bL_c-\sum\limits_{d,e,f}L_dL_eL_f+\cdots$；$\Delta_k$ 为在特征式 Δ 中除去与第 k 条前向通路相接触的回路而得的余式。

作为例子，对图 4 所示的系统信号流图应用梅森公式。在这个系统中，输入量 $R(s)$ 与输出量 $C(s)$ 之间，有三条前向通路，增益分别为：$P_1=G_1G_2G_3G_4G_5$；$P_2=G_1G_6G_4G_5$；$P_3=G_1G_2G_7$。有四个单独回路，增益分别为：$L_1=-G_4H_1$；$L_2=-G_2G_7H_2$；$L_3=-G_6G_4G_5H_2$；$L_4=-G_2G_3G_4G_5H_2$。互不接触的回路只有 L_1 和 L_2。因此，$\Delta=1-(L_1+L_2+L_3+L_4)+L_1L_2$。

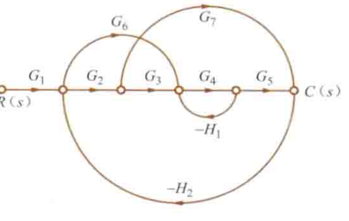


图 4　一个系统的信号流图

从 Δ 中将与通路 P_1 接触的回路去掉，得 $\Delta_1=1$。同理得 $\Delta_2=1$。又从 Δ 中将与通路 P_3 接触的回路 L_2、L_3、L_4 和 L_1L_2 去掉，得 $\Delta_3=1-L_1$，于是，总增益为

$$C(s)/R(s)=P=\frac{1}{\Delta}(P_1\Delta_1+P_2\Delta_2+P_3\Delta_3)$$
$$=[G_1G_2G_3G_4G_5+G_1G_6G_4G_5+G_1G_2G_7(1+G_4H_1)]/(1+G_4H_1+G_2G_7H_2+G_6G_4G_5H_2+G_2G_3G_4G_5H_2+G_4H_1G_2G_7H_2)$$

对于图 3（b）信号流图，同样可应用梅森公式（比上述例子简单），且所得结果与通过框图化简所得的一致。

xinxi anquan

信息安全

（information security） 使信息网络的硬件、软件及其系统中的数据受到保护，不受偶然的或者恶意的原因而遭到破坏、更改、泄露，系统连续可靠正常地运行，信息服务不中断的技术。主要保证信息的保密性、完整性、可用性、可控性和不可否认性。①保密性，指阻止非授权的主体阅读信息。②完整性，指防止信息被未经授权的篡改。③可用性，指授权主体在需要信息时能及时得到服务。④可控性，指对信息和信息系统实施安全监控管理，防止非法利用信息和信息系统。⑤不可否认性，指在网络环境中，信息交换的双方不能否认其在交换过程中发送信息或接收信息的行为。

国际标准化组织（international standard organization，ISO）基于开放系统互连（open system interconnect，OSI）参考模型的信息安全体系结构，定义了五类安全服务、八种安全机制和相应的安全管理标准。五类安全服务包括认证（鉴别）服务、访问控制服务、数据保密性服务、数据完整性服务和抗否认性服务。八种安全机制包括加密机制、数字签名机制、访问控制机制、数据完整性机制、认证机制、业务流填充机制、路由控制机制和公正机制。

中国陆续出台了一些信息安全方面的法律法规，如 1994 年颁布的《计算机信息系统安全保护条例》，1997 年修改《中华人民共和国刑法》后，专门在第 285 条和第 286 条分别规定了非法入侵计算机信息系统罪和破坏计算机信息系统罪等。

信息安全技术包括信息保密技术、信息隐藏技术、消息认证技术、密钥管理技术、数字签名技术、物理安全、操作系统安全、网络协议安全、应用层安全技术、防网络攻击技术、网络防御技术、反病毒技术。

信息保密技术　采用密码技术（关于信息加密和密文解密的技术），在信息传送之前通过加密信息来保证传送过程中信息的保密，信息接收后通过解密密文还原信息保证接收方的正常使用。

信息隐藏技术　信息隐藏是将秘密信息隐藏在另一非机密的载体信息中，通过公共信道进行传递。秘密信息被隐藏后，攻击者无法判断载体信息中是否隐藏了密码信息，也无法从载体信息中提取或去除所隐藏的秘密信息。信息隐藏主要研究信息隐藏算法、数字水印、隐通道技术和匿名通信技术等。

消息认证技术　消息认证指对消息的真实性和完整性验证，常用方法有 Hash 函数、消息认证码、MD5（message digest algorithm 5）算法、SHA-1（secure hash algorithm-1）算法等。

密钥管理技术　信息的保密取决于密钥的保密和安全，密钥管理负责密钥从产生到最终销毁的全过程，包括密钥的生成、存储、分配、使用、备份/恢复、更新、撤销和销毁等。

数字签名技术　数字签名可以解决电子数据的篡改、冒充、伪造和否认等问题。数字签名方案有 RSA（由 Ron Rivest、Adi Shamirh 和 LenAdleman 开发的。RSA 取名来自三位开发者的名字。RSA 是最有影响力的公钥加密算法）数字签名、DSA（digital signature algorithm）数字签名和 Schnorr 数字签名等。

物理安全　物理安全针对计算机网络的硬件设施，包括环境安全、设备安全和媒体安全三个方面。

操作系统安全　一般来说操作系统本身存在很多安全漏洞，针对具体版本的目标系统以及系统设置可以采用具体的漏洞解决方法。

网络协议安全　被广泛应用的 TCP/IP（transmission control protocol/internet protocol）协议在最初设计时没有考虑安全性问题，因此建立在其基础上的 Internet 网络的安全架构需要补充安全协议来实现，如应用层的 S-HTTP（secure hypertext transfer protocol）、PGP（pretty good privacy），传输层的 SSL（secure sockets layer）、TLS（transport layer security），网络层的 IPS（internet protocol security）以及网络接口层的 PPTP（point to point tunneling protocol）、L2TP（layer 2 tunneling protocol）等。

应用层安全技术　应用系统的安全技术指在应用层面上解决信息交换的机密性和完整性，防止在信息交换过程中数据被非法窃听和篡改的技术，如 Web 安全技术、电子邮件安全技术、身份认证。

防网络攻击技术　网络攻击分为信息收集、攻击实施、隐身巩固三个阶段，黑客在网络攻击时的三个阶段都会采用一系列的技术或手段，熟知黑客攻击的一般过程，有的放矢地做好准备，能弥补系统设计的缺陷，确保网络系统安全、可靠运行。

网络防御技术　分为被动防御和主动防御，被动防御是基于特定特征的、静态的、被动式的防御技术。主要有防火墙、漏洞扫描、入侵检测和病毒扫描技术等。主动防御是基于自学习和预测技术的防御技术，主要有入侵防御、计算机取证、蜜罐和网络自生存技术等。防火墙是隔离在本地网络与外界网络之间的一道防御系统。入侵检测技术是通过对计算机网络或计算机系统中的若干关键点收集信息并对其分析，从中发现网络或系统中是否有违反安全策略的行为和被攻击的迹象的技术。蜜罐则是一种资源，它的价值是被攻击或攻陷，即用特有的特征吸引攻击者，同时对攻击者的各种攻击行为分析并找到有效的应对办法。

反病毒技术　计算机病毒是一段附着在其他程序上的可以实现自我繁殖的程序代码，具有传染性、破坏性、隐蔽性、潜伏性与可触发性、诱惑欺骗性等特性。反病毒技术一般有特征扫描、启发式分析、完整性验证、虚拟机、沙箱、计算机免疫、动态陷阱、软件模拟、数据挖掘、预先扫描和安全操作系统技术等。沙箱是一个观察计算机病毒的重要环境，用于为一些来源不可信、具备破坏力或无法判定程序意图的程序提供试验环境，沙箱中的所有改动对操作系统不会造成任何损失。

xingjie zukang he sanjiaojie zukang de bianhuan

星接阻抗和三角接阻抗的变换

（transformation between star-connected and delta-connected impedances） 接成星形的三个阻抗和接成三角形的三个阻抗互相替代的等

效变换。它们之间的关系可用一组变换公式表示。按这组公式，用星接阻抗替换三角接阻抗或者反过来，不会影响稳态下电路其他部分的正弦电压和电流，常用于对称三相电路的分析和计算。

图 1 为三个阻抗 $\underline{Z}_1$、$\underline{Z}_2$、$\underline{Z}_3$ 接成星形（又称Y形）。图 2 为三个阻抗 $\underline{Z}_{12}$、$\underline{Z}_{23}$、$\underline{Z}_{31}$ 接成三角形（又称△形）。它们之间的变换公式如下

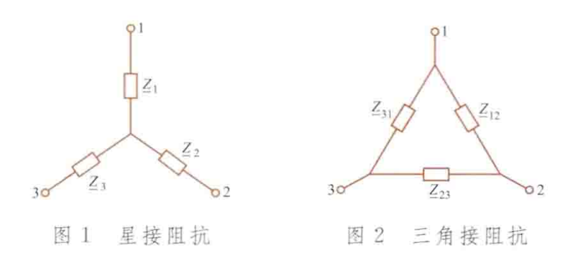


图 1 星接阻抗　　图 2 三角接阻抗

（1）将星形联结变换成三角形联结

$$\left.\begin{aligned}\underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}\\ \underline{Z}_{23} &= \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_2\underline{Z}_3}{\underline{Z}_1}\\ \underline{Z}_{31} &= \underline{Z}_3 + \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_3\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2}\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

（2）将三角形联结变换成星形联结

$$\left.\begin{aligned}\underline{Z}_1 &= \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31}}\\ \underline{Z}_2 &= \frac{\underline{Z}_{23}\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31}}\\ \underline{Z}_3 &= \frac{\underline{Z}_{31}\underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31}}\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

当三个星接阻抗相等，即 $\underline{Z}_1=\underline{Z}_2=\underline{Z}_3=\underline{Z}_Y$、三个三角接阻抗相等即 $\underline{Z}_{12}=\underline{Z}_{23}=\underline{Z}_{31}=\underline{Z}_\triangle$ 时，变换公式是

$$\underline{Z}_\triangle = 3\underline{Z}_Y,\ \underline{Z}_Y = \underline{Z}_\triangle/3$$

xuni cunchuqi

虚拟存储器　（virtual storage）　在具有层次结构存储器的计算机中，为用户提供一个比主存储器容量大得多的可随机访问的“主存储器”。虚拟存储技术使辅助存储器和主存储器密切配合，对用户来说，好像计算机具有一个容量比实际主存储器大得多的主存储器可供使用，因此称为虚拟存储器，简称虚存。虚拟存储器的地址称为虚地址或逻辑地址。程序运行时，中央处理机实际访问的存储器仍然是主存储器，主存储器和辅助存储器称为实际存储器，简称实存。实存的地址称为实地址或物理地址。

存储管理　虚拟存储器的实现是建立在页式、段式、段页式三种存储管理基础上的。20 世纪 80 年代中期以后推出的不少芯片，可同时提供这三种方式供用户选择。①页式存储管理：主存分配以页为单位，管理由若干页组成的作业。把作业地址空间分为若干固定大小的页，把主存储器空间分为大小与页相同的“存储块”，存储管理机构将作业的“页”离散地装入主存储器“存储块”内。用页表来实现作业逻辑地址到主存储器物理地址的映射。其优点是作业可离散地装入主存储器，避免了大量代码移动，页内零头小。缺点是每页不是相对完整的代码，不便于实现代码共享和保护。②段式存储管理：主存储器分配以段为单位，管理由若干段组成的作业。段是一组比较完整的代码，其长度是任意的。分段方法能使程序分模块编制，独立运行。系统通过段表指明各段在主存中的实际位置。段式管理具有便于分段动态扩张、动态链接、分段共享和存储保护等优点。③段页式存储管理：用分段方法管理作业地址空间，用分页方法管理主存储器地址空间。它兼有分段和分页两者之优点，操作系统一般都具有段页式管理功能。

硬件支持　实现虚拟存储器，须有两方面的硬件支持地址变换和缺页（段）检查。①地址变换：用于把用户程序中的逻辑地址变换为内存的物理地址。有寄存器映像、联想映像及段映像三种。②缺页（段）检查：检查被访问的页（段）是否已驻在主存储器中，若否，则将其从辅助存储器调入主存储器。地址映像及缺页（段）检查都属于每条指令的基本操作，应由硬件高速实现，即须有存储管理部件的支持。在 20 世纪 80 年代初期已开发出一批专门的存储管理部件（memory management unit，MMU）芯片。20 世纪 80 年代中期已把 MMU 和中央处理器做在一块芯片上，以提高中央处理器的运行速度和降低系统的成本。

实现原理　实现方法有请求页式、请求段式和请求段页式三种。原理基本相似。在请求式存储管理中，作业无须全部装入主存储器便可运行。在作业运行时必将发生被访问的页（段）尚未装入主存储器，此时由地址变换机构产生缺页（段）中断，由操作系统把所要访问的页（段）调入主存储器，并修改相应的页（段）表，之后作业又继续运行。如果主存储器已满，则必须先淘汰一部分页（段）后方能将缺页（段）调入。如果先淘汰的页（段）已被修改过，则应将该页（段）写回辅助存储器。

置换算法　用于确定主存储器中哪些页（段）可被调出，以腾空部分主存空间存放即将调入的页（段）。常用的置换算法有四种：①最近最少使用（least recently used，LRU）算法：置换最近一段时间内最久未用的页面。该算法出现较早也很有效，但需要较多的硬件支持。②最近不用（not recently used，NRU）算法：是 LRU 的近似算法，对硬件要求较少，只要求为每个页（段）设置一个引用位，置换引用位为 0 的页面。③先进先出（first-in first-out，FIFO）算法：置换在存储器中驻留时间最长的页面。④最佳（optimized production technology，OPT）算法：置换近期未被使用的页面，是一种理想算法。

xuni xianshi jishu

虚拟现实技术　（virtual reality technology，VR technology）　利用计算机生成一种高逼真的虚拟环境，并通过多种专用设备使用户“投入”到该环境中，实现用户与虚拟环境直接进行自然交互的技术。VR 也称为虚拟环境、灵境或人工环境。VR 技术可以让用户使用人的自然技能对虚拟环境中的物体进行考察或操作，同时提供视觉、听觉和触觉等多种直观而又自然的实时感知，从而最大限度地方便用户的操作，提高整个系统的工作效率。

基本特征　沉浸感（immersion）、交互性（interaction）

和想象性（imagination），这三个基本特征（简称三个“I”）强调人在VR系统中的主导作用，使信息处理系统适合人的需要，并与人的感官感觉相一致。构建一个VR系统的基本手段和目标就是利用并集成高性能的计算机软硬件及各类先进的传感器，去创建一个使参与者处于一个具有身临其境的沉浸感、具有自然和谐的交互作用能力、能帮助用户启发构思从而解决特定问题的信息环境。因此，为了设计和构造一个身临其境的交互式的虚拟现实系统，需要综合利用计算机图形学、图像处理与模式识别、智能接口技术、人工智能技术、多传感器技术、语音处理与音响技术、网络技术、人机交互技术、并行处理技术和高性能计算机系统等。

分类　常用的VR系统按其交互性和沉浸感的程度不同，可以分为桌面式、沉浸式、分布式和叠加式四类。

(1) 桌面式VR系统。系统使用个人计算机或低级工作站来产生交互式三维虚拟环境。它把计算机的屏幕作为用户观察虚拟环境的一个窗口，参与者需要使用输入设备或位置跟踪器来驾驭虚拟环境和操纵虚拟环境中的各种物体。

(2) 沉浸式VR系统。系统利用头盔显示器和数据手套等各种交互设备把用户的视觉、听觉和其他感觉封闭起来，从而使用户真正成为VR系统内部的一个参与者，并能够利用这些交互设备操作和驾驭虚拟环境，使用户产生一种身临其境，全身心投入和沉浸其中的感觉。

(3) 分布式VR系统。在以上两种系统的基础上，将位于不同物理位置的多个用户或多个虚拟环境通过网络相连接，并共享信息，从而使用户的协同工作达到一个更高的境界。

(4) 叠加式VR系统。系统采用穿透型头盔显示器，将计算机产生的虚拟物体或文字信息与用户所观察到的真实环境进行叠加或融合，从而拓展和增强用户对真实环境的感知能力，因此又被称为增强现实系统。

组成　VR系统的五个典型组成部分包括：①输入/输出设备；②VR引擎；③软件和数据库；④用户；⑤任务。

研究内容　①数据采集与处理技术；②感知建模（视觉建模、听觉建模和触觉建模）与显示技术；③绘制技术；④显示技术；⑤人机交互设备与系统；⑥VR开发环境与平台；⑦增强现实与定位技术；⑧分布式虚拟现实系统等。面向对象技术和面向智能体（agent）技术是VR系统软件设计的基本方法。

发展历程　1965年，Ivan sutherland在IFIP会议上发表的一篇题为“The ultimate Display”（终极的显示）的论文。论文中提出，人们可以把计算机显示屏当作“一个通过它观看虚拟世界的窗口”，以此开创了研究虚拟现实的先河。1968年Ivan sutherland研究成功头盔显示装置和头部及手部跟踪器。由于技术上的原因，20世纪80年代以前，VR技术发展缓慢，直到80年代后期信息处理技术的飞速发展促进了VR技术的进步。90年代初国际上出现了VR技术的热潮，VR技术开始成为独立研究开发的领域。由于VR系统可以提高仿真建模的逼真性和虚拟性，以身临其境的感受反映仿真对象和设计系统的性能，其应用前景广阔。由于虚拟现实在技术上的进步与逐步成熟，其应用在近几年得到了迅速发展，应用领域已由过去的娱乐与模拟训练发展到航空、航天、铁道、建筑、土木、科学计算可视化、医疗、军事、教育、娱乐、通信、艺术、体育等广泛领域。

参考书目

张效祥．计算机科学技术百科全书．北京：清华大学出版社，2005.

xuni yiqi

虚拟仪器　(virtual instrument)　以计算机为核心，由功能软件支持，具有虚拟控制面板、必要测量功能硬件和通信能力的测量及信息处理仪器。

原理结构　虚拟仪器的一般结构框图如图1所示。信号调理器将各种被测对象转换成量值适当的模拟电压，数据采集卡将模拟电压转化为数字信号后输入计算机，由测量功能软件实现测算数据处理，测算结果在虚拟的仪器面板上（见图2）显示出来。操作者经键盘和鼠标，可以像使用传统仪器一样，通过调控虚拟面板上的功能键或旋钮操作仪器。

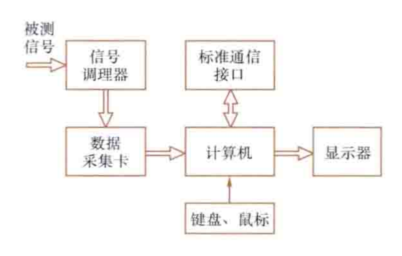


图1　虚拟仪器一般结构框图

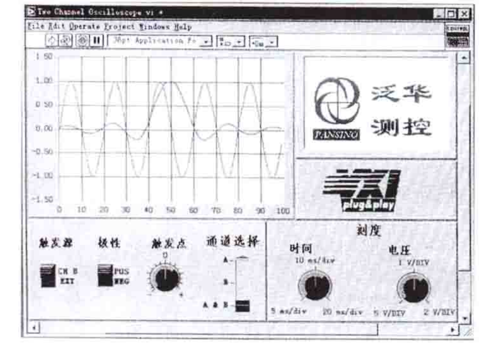


图2　虚拟仪器面板

构建方案　虚拟仪器的构建方案至少有六种，其构成框图如图3所示。它们依次是：①信号调理器＋数据、图像采集卡＋计算机；②带GPIB接口仪器＋GPIB接口卡＋计算机；③串行口仪器/PLC＋计算机；④VXI总线仪器＋计算机；⑤现场总线设备＋计算机；⑥其他计算机硬件板卡＋计算机。较为常用的虚拟仪器及其测试系统的构成方案为①、②、④以及它们三者的任意组合。

技术特点　虚拟仪器基于计算机而构建，其大量的测控功能以软件来实现。软件的灵活性，使用户可按需求自己定义测量功能。虚拟仪器测量功能硬件具有的模块化特征以及仪器总线及接口具有的标准化和规范化特征，使其扩展功能或参与组建自动测试系统均

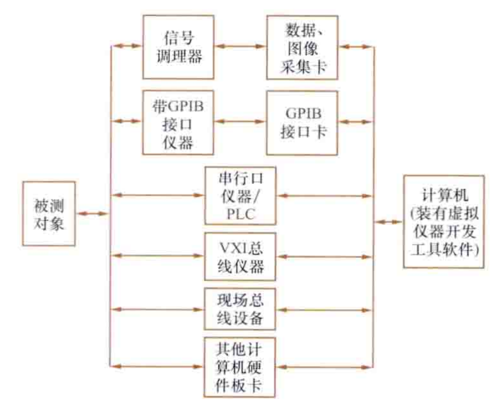


图3　虚拟仪器六种构成方案的框图

十分方便，只需添加或更换具体硬件功能板卡，而无需重新购买全新的硬件系统。在虚拟仪器中，测量信号的多种特性参数只需一个量化数据模块；所有被测信号共用一个量化通道，即对不同被测对象的测量使用同一校准和修正因子。这种将多种测试集于一体的测量方式，不仅可加快测量速度，而且能提高测量的准确度和可重复性。

虚拟仪器一般运行于 Windows 环境，故可同时启动多个应用，即利用一台计算机可同时组建多台虚拟仪器并实施测量。例如在测量电压的同时，还可进行频谱分析。

为开发虚拟仪器的软件，已有 LabVIEW 等多种十分成熟的图形化编程工具软件。

应用　在家用电器测试、印刷板电路/混合信号电路测试、电子元件/电力电子器件测试、仪器仪表自动检定系统组建、通信设备测试、电气设备在线监测以及国防军工、航空航天、生物医学、工厂企业产品在线检测等固定或可移动式现场测试工作中得到广泛应用，并正拓展应用于工程任务的设计、制造、测试、质量管理等所有环节。

xuanzhuan cichang

旋转磁场　(rotating magnetic field)　随时间在空间旋转的磁场。磁通密度矢量 $\boldsymbol{B}$ 的箭头末端沿圆周移动的旋转磁场称为圆旋转磁场。圆旋转磁场分为顺时针旋转磁场和逆时针旋转磁场。

顺时针旋转磁场　三个完全一样的线圈 AX、BY、CZ 在空间沿着顺时针方向彼此间隔 120°，其中 BY 在 AX 之后，CZ 又在 BY 之后（图 1）。若对这三个线圈的始端 A、B、C 通入正序的对称三相电流，则在三个线圈的中心处 O 所产生的磁通密度矢量 $\boldsymbol{B}$ 的模 $B=3B_{mp}/2$（B_{mp} 为每一相电流在 O 处产生的正弦磁通密度的振幅），矢量 $\boldsymbol{B}$ 与 x 轴的夹角 $\beta=\pi-\omega t$。这样，随着时间的增加，磁通密度矢量 $\boldsymbol{B}$ 的大小保持为 $3B_{mp}/2$ 不变，同时以角速度 ω 在空间作顺时针旋转，故该磁场为顺时针旋转的圆旋转磁场。图 2 是该磁场中在 $t=0$、$T/4$、$T/2$ 和 $3T/4$ 时的磁通密度矢量 $\boldsymbol{B}$ 的示意图（设 A 相电流 i_A 的初相位为零）。其中周期 $T=2\pi/\omega$，$\boldsymbol{r}_A^0$、$\boldsymbol{r}_B^0$ 和 $\boldsymbol{r}_C^0$ 是指示方向的单位矢量，长度为 1，方向则与所对应的线圈的绕行方向成右手螺旋关系。

逆时针旋转的磁场　三个线圈的始端 A、B、C 处通入负序的三相对称电流，则在三个线圈的中心处 0 的磁通密度矢量 $\boldsymbol{B}$ 的模 $B=3B_{mp}/2$，但矢量 $\boldsymbol{B}$ 与 x 轴的夹角 $\beta=\omega t$。随着时间的增加，磁通密度矢量 $\boldsymbol{B}$ 的大小不变，却以角速度 ω 做逆时针旋转，故该磁场是逆时针旋转的圆旋转磁场。

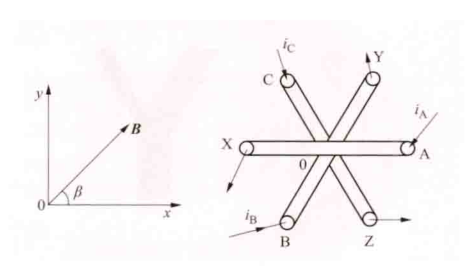


图 1　三个线圈的示意图

三相电动机的正转与反转　三相电动机定子上三个线圈叫做定子绕组。将该电动机接于用户端的三相电源线上，若通入定子绕组 AX、BY、CZ 始端的是正序的对称三相电流，绕组电流会在电动机内产生旋转磁场，使电动机正转；若通入的是负序的对称三相电流，则三相电动机反转。三相电动机正常工作时一般是正转的。这样，三相电动机接到三相电源线之前，需先用相序指示器确定好三相电源线的 A、B、C 的相序。

图 2　顺时针圆旋转磁场示意图

xunzhi fangshi

寻址方式　(addressing mode)　见指令系统。



yadian cailiao

压电材料 (piezoelectric materials) 在机械压力作用下发生极化而在两端表面间出现电位差的电介质。在异极晶体材料的特定方向上施加应力，晶体对应表面上分别出现正、负束缚电荷，其电荷密度与施加应力的大小成比例，当应力反向时，电荷改变符号，这种由机械应力使电介质极化，并形成晶体表面荷电的效应称为压电效应。反之，当加外电场于这种晶体时，晶体就会产生形变，称为逆压电效应。晶体的上述性质称为压电性。晶体的压电性是由于应力和应变等机械量与电场强度和电位移（或极化强度）等电气量之间的耦合效应造成的，并带有明显的方向性。压电晶体的内部结构具有非中心对称的异极对称型点群。

1880 年 J. 居里（J. Curie）和 P. 居里（P. Curie）首先发现 α-石英晶体具有压电性。1894 年 W. 沃伊特（W. Voigt）获得了产生压电性的晶体内部结构点群的关系。1954 年 B. 贾菲（B. Jaffe）开发了钛锆酸铅（PZT）二元系压电陶瓷。此后各种性能优良的压电材料不断问世。

按照形态特征和性质可以把压电材料进行分类（见表）。

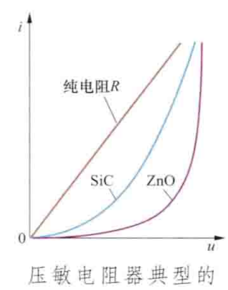
压电材料分类

压电材料特征和性质		压电材料名称
单晶体	仅具压电性单晶	α-石英、锗酸铋、α-碘酸锂等
	压电热释电单晶	钛酸钡、铌酸锂、锆酸铅等
	压电半导体单晶	氧化锌、氮化铝等
多晶体		钛酸铅、锆酸铅、钛锆酸铅（PZT）等压电陶瓷
薄　膜		氧化锌、氮化铝等压电薄膜
复合物		聚合物加铁电陶瓷，可以有 10 种不同的复合方式
聚合物		聚二氟乙烯（PVF_2）、聚氯乙烯、聚氟乙烯等

压电材料在压电滤波器、振荡器、换能器、压力传感器、声表面波器件和压电铁电光学器件等方面得到应用。广泛用来作滤波器材料的是压电陶瓷、压电石英、铌酸锂和钽酸锂等，其适应频率约为 1～200MHz，常用于多路通信中的话路带通滤波、卫星通信中的滤波等。晶体振荡器使用最多的是石英晶体振荡器和谐振器。压电换能器的种类繁多，使用广泛，如发射型换能器有扬声器、耳机、陶瓷蜂鸣器等，接收型换能器主要有微音器、拾音器等。压电振子作为超声波的发生或接收元件被广泛应用，如通信用的水中电话机、动力机上的清洗机等。压电材料可构成热敏、力敏、光敏、声敏等压电传感器。压电声表面波器件已投入实用，该器件几乎能完成各种电子器件的功能，如信号的延迟、滤波、振荡、编码以及各种变换。

yamin dianzuqi

压敏电阻器 (varistor) 一种电阻值对电压敏感且具有非线性伏安特性的电阻器。广泛采用的有碳化硅（SiC）、氧化锌（ZnO）压敏电阻器。它们在电压低于某一阈值时电阻值很高，只流过 1mA 以下的漏电流；但当电压高于此阈值，则电流急剧加大，可以通过 5～10kA 的电流（见图）。因此它们对瞬时过电压具有良好的抑制吸收作用，常用于抑制瞬态过电压。



压敏电阻器典型的非线性伏安特性

用途　压敏电阻器广泛地应用在家用电器及其他电子产品中，起过电压保护、防雷、抑制浪涌电流、吸收尖峰脉冲、限幅、消噪、保护半导体元器件等作用。

分类　按结构可分为：结型、体型、单颗粒层和薄膜压敏电阻器；按使用材料可分为：碳化硅（SiC）、氧化锌（ZnO）、金属氧化物、锗（硅）、钛酸钡等多种压敏电阻器；按伏安特性可分为：对称型（无极性）和非对称型（有极性）压敏电阻器。

主要参数　有标称电压、电压比、最大允许电压、残压比、通流容量、漏电流、电压温度系数、电流温度系数、电压非线性系数、绝缘电阻、静态电容等。①标称电压：通过 1mA 直流电流时，压敏电阻器两端的电压值。②电压比：压敏电阻器的电流为 1mA 时产生的电压值与压敏电阻器的电流为 0.1mA 时产生的电压值之比。③最大允许电压：压敏电阻器两端所能承受的最高电压值。④残压比：流过压敏电阻器的电流为某一值时，在它两端所产生的电压称为这一电流值的残压。残压比是残压与标称电压之比。⑤通流容量：也称通流量，是指在规定的条件（以规定的时间间隔和次数，施加标准的冲击电流）下，允许通过压敏电阻器上的最大脉冲（峰值）电流值。⑥漏电流：也称等待电流，是指压敏电阻器在规定的温度和最大直流电压下，流过压敏电阻器的电流。⑦电压温度系数：在规定的温度范围（温度为 20～70℃）内，压敏电阻器标称电压的变化率，即在通过压敏电阻器的电流保持恒定时，温度改变 1℃时压敏电阻两端的相对变化。⑧电流温度系数：在压敏电阻器的两端电压保持恒定时，温度改变 1℃时，流过压敏电阻器电流的相对变化。⑨电压非线性系数：压敏电阻器在给定的外加电压作用下，其静态电阻值与动态电阻值之比。⑩绝缘电阻：压敏电阻器的引出线（引脚）与电阻体绝缘表面之间的电阻值。⑪静态电容：压敏电阻器本身固有的电容量。

yanamiao maichong fangdianguan

亚纳秒脉冲放电管 (sub-nanosecond pulse discharge tube) 一种能产生高压快速电脉冲的充气放电管。简

称放电管。由它构成的脉冲发生器，脉冲宽度及上升时间都在亚纳秒（10^{-10} s）量级，重复频率几十至几千赫兹，脉冲幅度可达1000～5000V。广泛应用于高电压技术、电磁导弹、探地雷达、电磁脉冲灭菌和电介质阻挡放电人体指纹提取技术等方面。

结构　图1是放电管和金属同轴体的结构示意图。放电管是外径约0.8cm、长3cm的玻璃泡，管内充有15atm的H_2并设有汞池，汞可通过毛细作用润湿固体电极的表面。放电管在工作时须保持直立状态以避免两个电极在未放电时通过汞联通；同轴体不仅有利于获得稳定的脉冲波形，还避免了放电管工作时所产生的电磁辐射对其他电子设备的干扰。

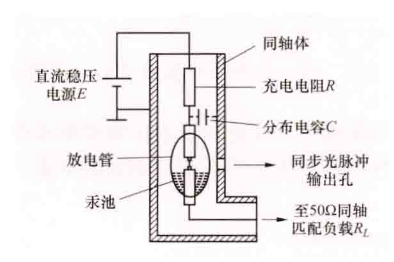


图1　放电管和金属同轴体的结构示意图

放电管的击穿　当放电管两端所加电压接近其击穿电压（约6000V）时，润湿固体电极的汞膜，在电场的作用下将发生形变，形成汞膜尖端并产生场致电子发射，电子在电场作用下运动，会在电极间产生高倍增的电子雪崩，使放电管在亚纳秒时间内迅速击穿，从开路状态快速转变为导通状态。

快速脉冲的产生过程　图1对应的等效电路如图2所示。分布电容C、分布电感L均由同轴体几何尺寸决定，一般，$C=5\sim100$pF，$L\approx20$nH。$R(t)$代表放电管在工作时的等效电阻。

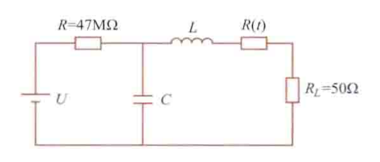


图2　放电管工作时的等效电路

直流电源U经电阻R向C充电，当C两端的电压达到放电管击穿电压时，放电管击穿，$R(t)$快速从高阻值下降为低阻值。C中存储的能量经L、$R(t)$、R_L释放，在R_L上形成一个快速脉冲。同时，C两端的电压将下降，当下降到不足以维持放电管导通时，放电管熄灭并恢复到截止状态。直流电源U再次经电阻R向C充电，这样，周而复始，在R_L上将形成周期性的电压脉冲。

特点　相对于其他固体快速脉冲器件，由于放电管易于同轴化，而且被汞膜润湿的电极在放电时不易受损，因此放电管寿命长，所产生的高压亚纳秒电脉冲波形稳定。此外，放电管在输出电脉冲的同时，还可同步产生亚纳秒宽度的光脉冲，这一独特的优点在核爆炸探测中的光及电磁脉冲测量，以及快速光敏器件时间特性的标定等领域中，均显示出其优越性。

yanmian fangdian

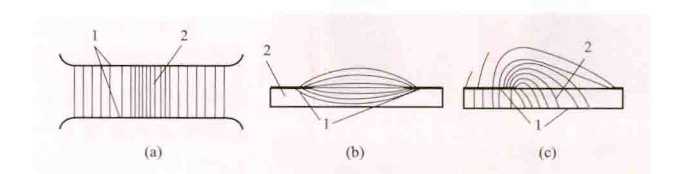
沿面放电　(discharge along dielectric surface)

沿不同凝聚态电介质交界面的放电。通常出现较多的是气体或液体电介质中沿固体电介质表面的放电。由于表面状态或电极布置等原因，固体介质的存在，使气体或液体间隙的放电电压降低。为了区别纯间隙放电和沿面放电，把前者称为间隙击穿，后者称为沿面闪络。各种具有高电位的金属部件，不能没有固体介质的机械支持，因此工程实际中经常会碰到许多沿面放电的问题。

在均匀或不均匀电场中，沿面放电电压降低的机理是不同的。

均匀电场下的沿面放电　在图（a）中，固体介质处在均匀电场中，电力线与固体介质表面平行。由于固体介质的密度不均匀，表面上存在微细的凹凸和杂质，大气中的潮气也会使介质表面蒙上湿膜，均可引起介质表面局部电场的畸变，或造成局部电气强度下降，从而导致间隙放电电压的降低；严重时，固体介质的存在，能使间隙放电电压降低到纯间隙放电电压的1/3。

不均匀电场下的沿面放电　不均匀电场中沿固体介质表面的放电，又可分为电场有弱垂直分量［图（b）］和电场有强垂直分量［图（c）］两类。图（b）中电场的切线分量较强，垂直分量较弱。这种情况的典型例子是棒型支柱绝缘子。其沿面放电电压比间隙击穿电压低得不多，而且基本上随极间距离的增长而上升。图（c）中一个电极附近电力线比较密集，且电场具有很强的垂直分量，这种情况的典型例子是套管。这种放电形式与前两种有所不同，在交流电压或瞬态电压的作用下，随着外施电压的升高，在电场较强的电极附近，先出现蓝紫色的电晕放电，然后变成弥散的带状放电，发光仍比较弱，放电通道内的电压降仍比较大，放电通道长度随外施电压的升高而增长。当施加的交流或冲击电压超过某一值时，个别点将出现树枝状的明亮火花，叫作滑闪放电。滑闪放电通道内的电流密度较大，电压降比较小。其伏安特性是下降的，稍增电压，即可使滑闪放电增长许多，显然闪络电压很低。一般认为：由于垂直分量使带电质点与固体介质表面间的碰撞，引起局部表面过热，产生热电离。在电气设备中应避免滑闪放电。



介质在电场中的特征布置
（a）均匀电场；（b）、（c）不均匀电场
1—电极；2—固体介质

提高沿面放电电压的方法　沿面放电电压的降低，是由于电场畸变而引起的，但机制不同。在均匀电场中，应采用均一的、表面不吸潮的材料。在不均匀电场中，改善电极形状或采用屏蔽电极，都可提高沿面放电电压。在强垂直分量的不均匀电场中，在施加交流或冲击电压时，采用电容率小的绝缘材料，或增加其厚度，对改善电场分布和提高滑闪电压及闪络电压都是有益的。

yan wuran dianjiezhi biaomian fangdian

沿污染电介质表面放电　(discharge along a contaminated dielectric surface)

在电压作用下，暴露在大气中受污染的固体电介质表面，出现泄漏电流、局部电弧和闪络的现象。电力设备（特别是户外运行的电力设备）的外绝缘暴露在大气中，受到环境污染后绝缘表面沉积一层污

垢，其中包含电解质和惰性物质，遇雾、露、毛毛雨等天气，绝缘表面湿润导电，在电压作用下，产生泄漏电流和局部电弧；局部电弧发展延伸，直至连通两极，导致闪络，简称污秽闪络或污闪。电力设备外绝缘的设计，一般都保证在晴天和雨天，即使出现各种过电压，也不应发生闪络。但污染外绝缘有可能在运行电压下发生闪络。

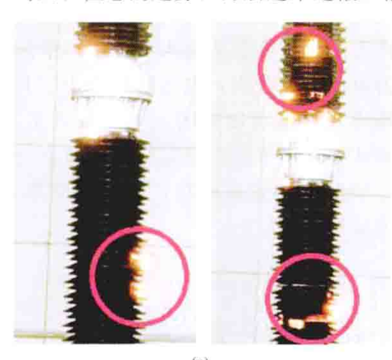
放电过程　可分为积污、湿润、局部电弧、闪络四个阶段。

(1) 积污：大气中的污物沉积到介质表面。污物有自然的，也有人为的。如沿海地区的盐分，盐碱地带的盐碱，各种工业污秽和农业地区的农药、化肥及尘埃等。

(2) 湿润：沉积在介质表面的污层，在干燥时一般是不导电的，但在雾、露、毛毛雨下污层受潮后，其中含有的电解质溶解电离，污层就导电了，在电压作用下，产生了泄漏电流。

(3) 局部电弧：泄漏电流的焦耳热能烘干潮湿污层，在电流密度大的部位出现干区，由于电压集中到干区，在一定条件下就会出现跨越干区的辉光放电。由于污层的继续受潮和泄漏电流的不断增大，辉光放电将转变成局部电弧；弧道的压降很低，其伏安特性是下降的。

(4) 闪络：由于干区的扩大和电流的交变，局部电弧时燃时灭；但总的趋势，污层越来越潮，泄漏电流越来越大，局部电弧能维持的长度越来越长，一旦电弧延伸到贯通两极，就发生了污闪。


(a)

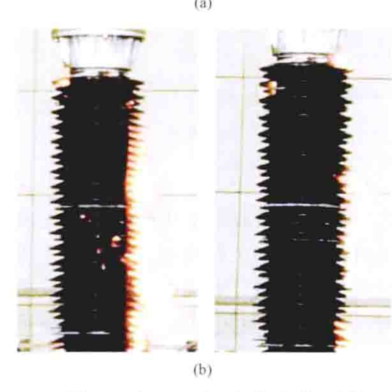

(b)

图 1　±800kV 支柱绝缘子柱直流污秽闪络
(a) 半飘形电弧（部分电弧紧贴绝缘子表面，部分在空气中）；(b) 全飘形电弧（电弧全在空气中）

图 1 所示为试验室内观察到的直流污秽闪络现象。

物理模型　沿污染介质表面放电的物理模型如图 2 所示。其数学表达式为 $U = AxI^{-n} + IR(x)$，式中 U 为外施电压；x 为局部电弧长度；I 为电流；n 为电弧常数；$R(x)$ 为电弧短路部分外的剩余污层电阻。外施电压必须维持电弧压降 AxI^{-n} 和电阻压降 $IR(x)$。电弧压降随电流的增大按指数规律下降；电阻压降则随电流的增大而上升。因此，为维持某一长度的局部电弧，必然需要一最小电压。随局部电弧的延伸，此最小维持电压将随之增大，但超过某一弧长，此最小维持电压反将减小。即使电压不变，局部电弧也将迅速延伸，直至闪络。此弧长叫做临界弧长，相应的电压和泄漏电流，叫做临界电压和临界泄漏电流，临界电压即污闪电压。由此可求得相应于某一污层的电导率沿泄漏路径的污闪梯度，小于此梯度，不发生污闪。

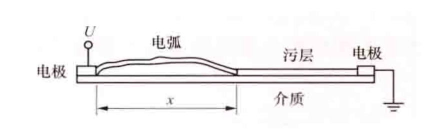


图 2　沿污染介质表面放电的物理模型

提高污闪电压的方法　增长泄漏距离可提高污闪电压。如增加绝缘子元件个数，或采用泄漏距离较长的耐污绝缘子，在绝缘子表面涂覆憎水性涂层或用有憎水表面的材料作绝缘子，都能抑制泄漏电流，提高污闪电压。

yanghuaxin
氧化锌　(zinc oxide)　锌的氧化物，一种宽带隙半导体材料。分子式为 ZnO，六角晶系，晶格常数 $a=0.324$nm，$c=0.521$nm。室温下带隙约 3.3eV，常温下电子迁移率为 $0.022m^2/(V\cdot s)$，属Ⅱ－Ⅵ族半导体。质量密度 $5.606g/cm^3$，电容率$\varepsilon_s=8.12$，$\varepsilon_\infty=3.72$。通常情况下氧化锌为 N 型半导体，将其转变为 P 型半导体还非常困难。能吸收紫外线。熔点 1975℃，1800℃以上开始升华。

有两种方法可使氧化锌在常温附近成为半导体：①纯 ZnO 经高温热处理可成为本征半导体，原因是一部分氧原子逃逸，晶格中形成氧缺位或锌填隙缺陷结构，缺陷能级为施主能级。ZnO 成为本征 N 型半导体，其电导率与热处理温度、降温速度有密切关系。②用Ⅰ、Ⅲ族元素掺杂形成杂质半导体。常用的Ⅰ族元素为锂，Ⅲ族元素为铝、铟和镓等。氧化锌无天然产物，由锌盐热分解或在空气中燃烧金属锌可制得白色粉末状氧化锌，俗称锌白。以粉末氧化锌为原料，人工生长单晶或气相沉积薄膜，利用其压电效应，可用作制造电声器件的材料，亦称为压电半导体。其更主要的用途是作为氧化锌系陶瓷半导体原料，用法是以氧化锌粉体为主成分，加入必要的其他几种氧化物添加剂（添加剂总含量约为 5%mol），经一般电子陶瓷工艺处理后便可制成致密的陶瓷体。

视添加剂成分和含量的不同，氧化锌可制成多种具有不同功能的陶瓷：压敏氧化锌陶瓷，湿敏或气敏氧化锌陶瓷，化学反应催化剂陶瓷。①压敏氧化锌陶瓷：加入 Bi_2O_3 或 Pr_2O_3 和非饱和过渡金属氧化物 Co_2O_3、MnO_2 等添加剂的氧化锌半导体陶瓷，具有优异的非线性伏安特性，低电压下具有高电阻，电压增加至一定值后，瓷体变成可通过瞬态电流密度为$10^2\sim10^3A/cm^2$的良导体，其伏安特性一般用 $I\propto U^{\alpha}$ 表示，非线性指数 α 可大于 30。常用压敏氧化锌陶瓷的伏安特性曲线如图 1 所示。其电压范围和电流承受能力可分别通过改变瓷体厚度和面积来调整，与添加剂成分及工艺亦有关。用压敏氧化锌陶瓷制造的压敏电阻是电气技术领域中过电压保护的重要器件。1968 年首次制成这种材料与器件，

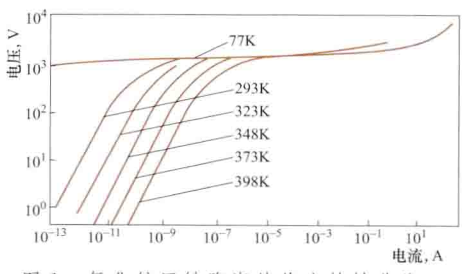


图 1　氧化锌压敏陶瓷的伏安特性曲线

1972年被广泛应用。②湿敏或气敏氧化锌陶瓷：加入SnO、ZrO_2、Ga_2O_3等制成多孔陶瓷，其气孔相当于开放的毛细管结构，其表面积很大，可以吸附或凝结水蒸气及其他气体，视添加成分不同，可制成湿敏或对H_2、CO等敏感的陶瓷敏感器件。③用作化学反应的催化剂。

图2所示为氧化锌避雷器、ZnO阀片和ZnO晶粒。

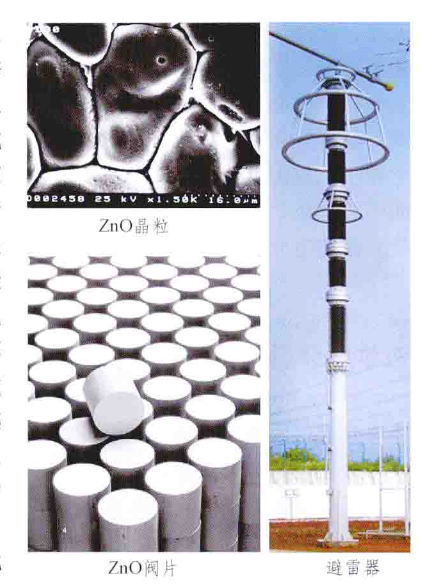


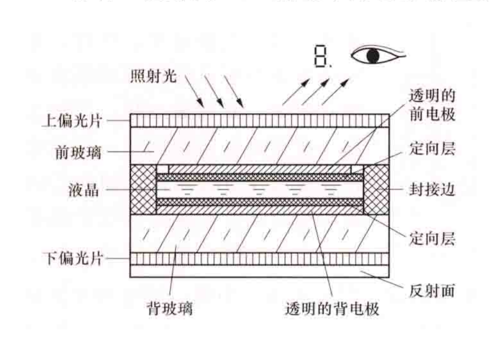
图2　氧化锌避雷器ZnO阀片和ZnO晶粒

yejing xianshi qijian

液晶显示器件　(liquid crystal display，LCD)　利用液晶材料在电场作用下光学性质发生改变而实现图像显示的平板显示器件。广泛应用于计算机、电视机、示波器等电子设备的显示领域。

液晶　复杂的有机物质，在一定温度范围内，既具有液体的流动性，又具有固态晶体的光学性质。

结构　反射式LCD的基本结构示意图如图所示。两块平板玻璃间距约几个微米，四周用环氧树脂密封，内部充有液晶。在玻璃板外侧，分别贴有偏振方向相互垂直的偏光片。定向层的作用是使液晶分子按特定的方向排列。



反射式LCD的基本结构示意图

前电极既可以是七个线段拼成的“8”字形以显示数字，也可以是$m \times n$个点状电极组成的矩阵以显示画面。背电极的形状则与驱动方式有关，一般是一块完整的公共电极。

原理　液晶分子的排列状态和光学特性在电场的作用下会发生变化。如图所示，当前电极和背电极间不加电压时，该处的液晶分子按照定向层决定的特定方式进行排列，照射光通过上偏光片后，成了偏振光。这束光在通过液晶时，光的偏振方向会被液晶旋转90°（这种性质称为液晶的旋光性），于是它能通过下偏光片到达反射面而被反射，反射光也同样可以通过上述各片而出射，人眼看到的是亮背景。当前电极和背电极间加电压时，液晶分子排列方向与电场方向平行，液晶的旋光性消失了，于是照射光无法通过下偏光片而到达反射面，人眼就接收不到光，看到的就是加电压的电极组成的暗画面。因此，以合适的驱动方式在各像素点上施加脉冲电信号，即可显示出所需的“白底黑字”字符或者图像。

液晶本身不发光，只是在电场作用下，对光进行调制，因此LCD需要光源。计算器、电子表等可用环境光作光源，电视机、计算机、手机等有较高亮度要求的显示设备，则需要专门的背光源。常见的背光源有冷阴极荧光灯、发光二极管、电致发光板等。

在彩色LCD中，每一个像素都是由三个液晶单元格构成，每个单元格前面都设有滤色膜。通过不同单元格的光经滤色后在空间混色，就可以在屏幕上显示出彩色画面。

特点　具有体积小、重量轻、驱动电压低、功耗小、无辐射、无污染等特点。传统上认为它适应温度范围窄、响应速度慢、视角小，随着科技的不断进步，这些性能都已得到大幅度的改进。

yeti dianjiezhi diandao

液体电介质电导　(electrical conduction in liquid dielectrics)　液体电介质在电场作用下所具有的流过极小漏电流的性能。在高压电力设备中多采用液体电介质作为绝缘媒质，它们具有电气强度高、绝缘性能好并易于导热等优点。液体电介质在纯净情况下电导率可低至10^{-13}S/m；如混入杂质，则电导率可增加到10^{-9}S/m。

液体电介质的电导按其载流子的不同可区分为：离子电导、胶体电泳电导和电子电导三种。通常以前两种为主。电子电导只在液体接近击穿的高场强（$E > 10^7$V/m）下才会明显产生。液体中电导电流的伏安特性通常呈线性关系，故可用介质电导率γ或介质电阻率ρ来表征其电导特性。

(1) 离子电导。液体电介质中的离子来源于极性液体介质分子本身的热离解和杂质分子的热离解。液体电介质中离子在电场作用下的定向迁移与在固体中的离子迁移相似，是以热跃迁方式进行的。液体电介质中的离子电导率γ与温度T呈指数关系，即$\gamma = Ae^{-B/T}$，A近似为常数，B与活化能有关。许多液体电介质如电容器油、变压器油、环己烷等均满足上式。

(2) 电泳电导。工程中所用的液体电介质中有时会含有树脂、水等胶体颗粒，这些胶粒本身带电，在电场作用下作定向迁移，就构成电泳电导。由于胶粒的平均迁移率μ与液体黏度η成反比，故电泳电导率γ（$\gamma = qn_0\mu$，式中q为载流子所带电荷量；n_0是载流子浓度）与η的乘积，为一与温度无关的常量。此关系称为华尔屯定律。

(3) 电子电导。在接近液体电介质击穿的强电场下，其电流随电场强度呈指数关系上升，此时为电子电导，并伴有碰撞电离现象发生，而电子的初始来源往往是电极的场致发射。

yeti dianjiezhi dianjichuan

液体电介质电击穿　(electric breakdown in dielectric liquids)　在电场作用下，纯净液体电介质的分子因电子碰撞而电离，最终导致液体电介质由绝缘状态突变为良导电状态的过程。液体电介质电击穿是液体介质击穿的一种。

电击穿理论认为，对于纯净的液体电介质，其伏安特性可划分为三个区段。

第一区段为低场强区。参与导电的带电粒子是因自然界中射线对液体分子的电离作用，或因液体中不可能完全去除

的微量杂质在电场作用下解离而产生的。随电压的上升，电流线性增加。

第二区段为中场强区。由于越来越多的离子已参与了导电，随电压的升高，电流增加的速度变慢，呈现出不十分明显的饱和趋向。在一、二两个区段中，液体电介质中虽有电流流过，但数值甚微，液体仍具有很高的电阻率。

第三区段为高场强区。因场致发射，或因强电场作用增强了热电子发射而脱离阴极的电子，在电场中运动、加速、碰撞液体分子，且以一定的概率使液体电介质的分子电离。电场足够强时，电子在其运动过程中，不断使液体分子发生碰撞电离，电子迅速增加，因碰撞电离而产生的正离子移动至阴极附近，增强了阴极表面的场强，使电极发射的电子数增多。这样，随着极间电压的不断升高，电流急剧增加，液体电介质最终失去绝缘能力，发生击穿。

一些高度纯净液体电介质的击穿场强如表所示。

纯净液体电介质的击穿场强

电介质名称	击穿场强（MV/cm）
正己烷	1.1～1.3
苯	1.1
优质矿物油	1.0～4.0
硅油	1.0～1.2
液氦	1.6～1.88

yeti dianjiezhi jichuan

液体电介质击穿 (breakdown in dielectric liquids)

在电场作用下，液体电介质由绝缘状态突变为良导电状态的过程。

纯净液体电介质与含杂质的工程液体电介质的击穿机理不同。对前者主要有电击穿理论和气泡击穿理论，对后者有气体桥击穿理论。沿液体和固体电介质分界面的放电现象称为液体电介质中的沿面放电。这种放电不仅使液体变质，而且放电产生的热作用和剧烈的压力变化可能使固体介质内产生气泡。经多次作用会使固体介质出现分层、开裂现象，放电有可能在固体介质内发展，绝缘结构的击穿电压因此下降。脉冲电压下液体电介质击穿时，常出现强力气体冲击波（即电水锤），可用于水下探矿、桥墩探伤及人体内脏结石的体外破碎。

液体电介质击穿过程的试验研究还不很充分，全面描述液体电介质击穿的理论尚未形成。对于纯净的液体电介质，存在两种用来解释击穿过程的理论——电击穿理论（见液体电介质电击穿）和气泡击穿理论（见液体电介质气泡击穿）。对于或多或少含有水分、纤维等杂质的工程用液体电介质的击穿过程，可用小桥击穿理论（见液体电介质小桥击穿）解释。

yeti dianjiezhi qipao jichuan

液体电介质气泡击穿 (bubble breakdown in dielectric liquids)

在电场作用下，因纯净液体电介质中出现气泡，气体发生电离最终导致液体电介质由绝缘状态转变为良导电状态的过程。

观察到液体电介质的击穿电压受压力影响的现象，说明在液体电介质的击穿过程中存在着形成气泡的转变过程。在外施电场较强时，纯净液体电介质中产生气泡有下述几种可能：①因场致发射，或因强电场作用加强了热电子发射而脱离阴极的电子，在电场中运动形成电子电流，加热了液体，使它分解出气泡；②电子在电场中运动，碰撞液体电介质分子，使液体分子解离产生气泡；③电极表面突起物处的电晕放电，使液体气化生成气泡；④电极表面吸附的气泡表面上积聚电荷，在电场力的作用下，将气泡拉长。

液体电介质中出现气泡后，在电场作用下气泡发生电离，温度升高，体积膨胀，电离进一步发展。电离产生的带电粒子又撞击液体分子，分解出气体。电离的气泡或在电极间形成小桥，或使液体电介质中的电场分布发生畸变，最终导致液体电介质击穿。

yeti dianjiezhi xiaoqiao jichuan

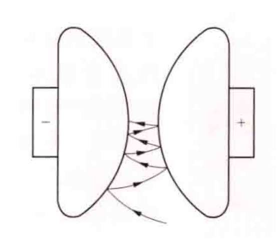
液体电介质小桥击穿 (breakdown in dielectric liquids caused by impurity bridge)

在电场作用下，工程用液体电介质中因杂质形成小桥，导致液体电介质由绝缘状态突变为良导电状态的过程。

工程用液体电介质中含有水分和固体杂质（如纤维、碳粒、金属末、尘埃、油漆）。由于水滴、潮湿纤维类杂质的介电常数比液体电介质的大，在电场作用下，它们将被吸引到电场强度较大的区域，顺着电力线方向排列起来，在电极间场强较大处形成了杂质小桥。小桥的电导和介电常数都比液体电介质的大，这就使电场产生了强烈畸变，造成液体电介质的击穿场强下降。如杂质足够多，则还能形成贯通电极间隙的小桥。由于小桥电导大，沿小桥将流过较大的泄漏电流，小桥强烈发热，使液体电介质和水局部沸腾气化，击穿将沿此“气桥”发生。

电场和电压种类对杂质形成小桥的过程有显著影响。

在比较均匀的电场中，杂质的影响特别明显。在直流电压作用下，杂质被吸引到电场强度较大的地方。杂质接触电极后带有与该电极同号的电荷，并被推向异号电极。在接触异号电极后，杂质又遭到推斥，重新向另一电极运动。这样，杂质将按图中所示的路径逐渐向电极间积聚，并构成小桥，导致击穿。在交流电压作用下，杂质也将被吸引入电极间隙，但它们的运动受电极上电压极性变化的影响，在长间隙中难于形成连续小桥。杂质堆积在电极附近，形成不连续小桥，使电场发生显著畸变，降低了液体电介质的击穿场强。在冲击电压作用下，因电压作用时间很短，杂质来不及运动，它们对液体电介质击穿场强的影响，不如直流及交流电压下严重。



杂质在电极间的运动路径

在极不均匀电场中，曲率较大的电极附近，液体电介质会强烈扰动，不可能形成小桥，杂质对液体电介质击穿场强的影响较小。

当电极面积增加，或当处于高场强下的液体电介质体积增加时，杂质形成小桥，导致击穿的可能性增加。因此，随着电极面积的增加，或随着高场强下的液体体积（最大场强的90%以上场强作用下的液体体积）的增加，液体电介质的击穿电压下降。这种击穿电压随电极面积或高场强下液体体积的增加而下降的效应称为面积效应或体积效应。

yeti jueyuan cailiao

液体绝缘材料 (insulating liquid)

电气设备中用以阻止传导电流的液体电介质，又称绝缘油。主要用于变压

器、电容器、断路器、电缆等油浸电气设备中，用以取代空气填充固体绝缘材料内部或电极间的空隙，改善设备的绝缘性能与散热能力。在电容器中还可增大单位体积的储能量，在断路器中起绝缘和灭弧双重作用。从来源看，绝缘油主要有矿物绝缘油、合成绝缘油和植物绝缘油。工程中使用最早的是植物油，如蓖麻油、菜籽油等。为满足各种电气设备的不同要求，发展了多种类型的合成油，如十二烷基苯、硅油等。作为绝缘油使用最多的是矿物油。绝缘油应具有优良的介电性能，即：电气强度高，介质损耗角正切值小，绝缘电阻率高，电容率ε_r小（在电容器中则要求ε_r大）；散热能力强，即比热大，热导率大；老化稳定性好；与之相接触的固体材料之间的相容性优良；汽化温度高，闪点高，不易燃烧；凝固点低，具有适当的黏度；毒性低。为提高其绝缘性能，常用白土、硅胶等吸附剂进行精制处理，亦可用电净化等方法去除杂质。使用过程中绝缘油受热、氧、光、金属、电场及水分的作用会产生老化。为抑制其老化，应加强设备的散热，隔绝空气并加入防老化剂。矿物油中常用酚类或芳香胺类抗氧剂，各类合成油中除加入酚类抗氧剂外，还常加入各类环氧化合物作稳定剂。判断绝缘油的老化程度主要是测量油的酸值、沉淀物及 tanδ 的增量。为改善单一品种绝缘油的性能，有时用两种或多种绝缘油混合使用，以满足不同的需要。

yiwei jicunqi

移位寄存器 （shift register） 同时具有数码的寄存和移位两种功能的时序逻辑电路。移位寄存器实现数据传输的串行到并行或并行到串行的转换；可构成环形寄存器、扭环型寄存器和脉冲发生器。

工作原理 移位寄存器是利用触发器的记忆功能寄存数据，利用逻辑门对数据传送和移位方向进行控制。在移位脉冲 CP 作用下，数码逐位依次向右移动者称右移移位寄存器，如图 1 所示；向左移动者称左移移位寄存器，如图 2 所示。数码输入后，由 CP 控制先移入高位触发器 D3，然后逐位移至低位触发器D2～D0（CP 作用下所有触发器同步触发输出）。设有一四位并行输入数码 $D_3D_2D_1D_0$，低位先由图 1 串行输入端输入，经 4 个 CP 脉冲作用后，并行输出端数据$Q_3Q_2Q_1Q_0=D_3D_2D_1D_0$，在第 4 个 CP 脉冲后，数码$D_3D_2D_1D_0$从串行输出端Q_0移出。图 1 和图 2 可实现串入并出和串入串出两种工作方式。图 3 可实现并行输入数码，4 个与非门由寄存指令控制，将数码 D_0～D_3 送入相应触发器 D0～D3 的 S_d 端，当数码 D=1 时，寄存指令（假设为高电平有效）到来后 $S_d=0$，触发器 Q 端置 1。所以 $D=1$ 时，$Q=1$；$D=0$ 时，$Q=0$，从而图 3 可实现并行输入数码的目的。

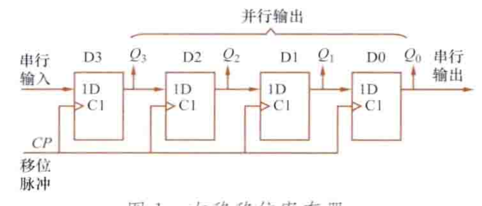


图 1 右移移位寄存器

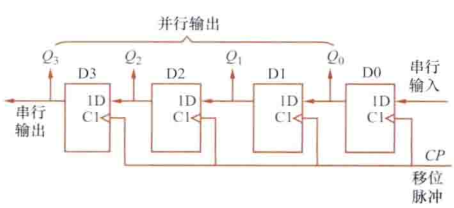


图 2 左移移位寄存器

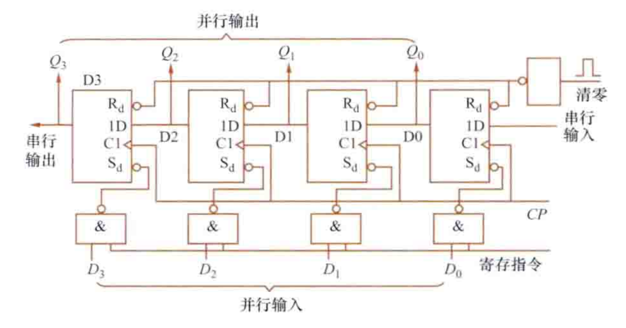


图 3 具有并行输入数码的移位寄存器

若欲在同一电路中同时具有右移和左移的双向移位功能时，可将触发器的输出有选择地接到相邻触发器的输入端，即构成如图 4 所示的兼有右移和左移两种功能的双向移位寄存器。图中每个触发器的输入与左右两个触发器的输出之间，通过与或门由移位方向控制信号 X 选择。当$X=1$时，四个与或门左半部选通，右移串行输入数码送入触发器 D3 的 D 端，触发器 D3 的 Q3 端通过与或门接到触发器 D2 的 D 端，依次类推，电路进行右移操作。当 $X=0$ 时，四个与或门右半部选通，电路进行左移操作。

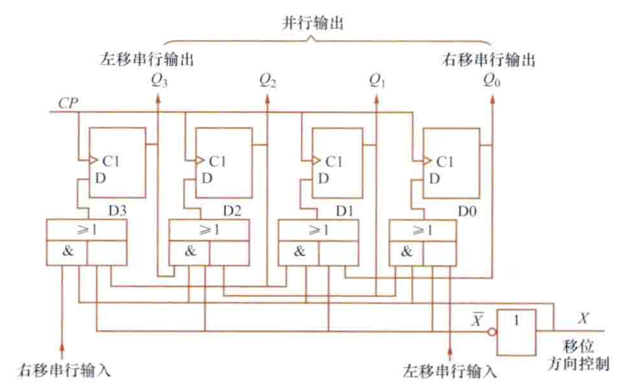


图 4 双向移位寄存器

特点 ①各寄存单元组成结构相同；②寄存单元数等于数码可寄存的位数；③各寄存单元共用一个 CP 同步工作；④每个寄存单元的输出与相邻下一位寄存单元输入相连；⑤若将串行输入端与串行输出端首尾相连，可构成环型移位寄存器，可使输出的数码不丢失。

yibu jishuqi

异步计数器 （asynchronous counter） 能累计输入脉冲个数且计数单元的各触发器不在同一时刻发生状态更新的时序逻辑电路。异步计数器结构简单，应用广泛，除具有计数功能外，还可组成分频器和时间分配器等。

工作原理 异步计数器通常是由若干个接成计数功能的触发器组成。若为 JK 触发器，则 $J=K=1$；若为 D 触发器，则输入 $D=\overline{Q}_n$。图 1 为由三个 JK 触发器串接组成的三位二进制异步加法计数器电路，

图 1 异步加法计数器电路

图 2　加法计数状态图

可累计 $N=2^3$ 个输入脉冲数。图 2 为该电路的计数状态转换图，当第 8 个计数脉冲输入后，各触发器输出 Q 均恢复为 0 态，所以三级触发器组成一个八进制（2^3）计数器，n 级则可组成 2^n 计数器，这种计数器又称为模 2^n（$M=2^n$）计数器。该计数器电路中，下降沿触发的触发器，加法计数时前级触发器的 Q 端接下级触发器 CP 端，减法计数时前级触发器 $\overline{Q}$ 端接下级触发器 CP 端。上升沿触发的触发器则相反。

图 3 电路实线部分为模非 2^n（$M\neq 2^n$）计数器，是一个具有自启动能力的异步五进制（$M=5$）计数器电路，当第 4 个计数脉冲输入后，各触发器的输出 $Q_3Q_2Q_1$ 状态为 100，在第 5 个计数脉冲到来后各触发器状态要回到 000 态，为此触发器 D3 通过 J 端引入线使状态复零，触发器 D1 和 D2 状态不变。若在图 3 五进制计数器的基础上，增加一位二进制计数器，如图中触发器 D0（虚线部分），可构成一个十进制计数器（$2\times5=10$）。同理，若一个模 2^n 与一个模非 2^n（设模 $M=3$）计数器组合，可构成 $2^n\times3$（$n=1$，2，3，…）进制计数器。在集成计数器中，常采用反馈归零法实现任意进制的计数功能。

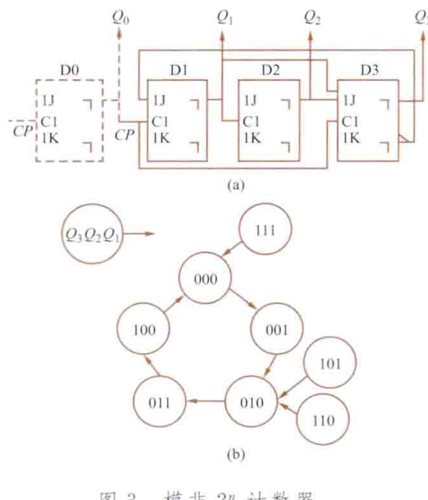


图 3　模非 2^n 计数器
（a）电路；（b）状态图

分类　①按模（M）分：有模 2^n（$M=2^n$）计数器和模非 2^n（$M\neq 2^n$）计数器，又常相应地称为 2^n 进制计数器和非 2^n 进制计数器。②按触发器状态更新情况分，有异步计数器和同步计数器。③按计数输出状态递增递减分，有加法计数器、减法计数器和可逆计数器。

特点　①n 个触发器最多可组成 n 位二进制计数器，具有 2^n 种状态。②计数单元各触发器异步工作，由低位输入，状态更新由低位到高位依次进行，又称串行或行波计数器。③异步任意进制计数器，可通过 2^n 进制与其他进制串接构成，还可利用反馈归零法实现。④各触发器之间连接根据触发器类型和要求确定。⑤进（借）位信号，要等低位触发器状态更新后逐级送至高位，故电路延时时间较长。

yihuomen

异或门

（exclusive or gate）　实现异或逻辑关系的门电路。它是一种常用的逻辑门。

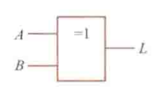
“异或逻辑”关系是指：当两个输入逻辑变量取值相异时，函数值为 1；反之，当两个输入逻辑变量取值相同时，函数值为 0。

异或逻辑的表达式为 $L=A\overline{B}+\overline{A}B=A\oplus B$，读作 L 等于 A 异或 B。

异或门的图形符号如图所示。其真值表如表所示。

异或门真值表

A	B	L
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



异或门的图形符号

在异或门中，如果输入 $B=0$，则 $L=A$；如果输入 $B=1$，则 $L=\overline{A}$。这表明在一定条件下，异或门可作缓冲器或者反相器使用。

yimaqi

译码器

（decoder）　将每一个输入代码转换为另一个对应的输出代码，即完成翻译代码工作的集成逻辑器件。它是组合逻辑电路的一个重要部分。

按照功能和输出特点的不同，译码器可分为通用译码器和显示译码器两大类。

通用译码器　将每个输入代码转换为与之一一对应的信号输出，而且任何时刻最多只有一个输出为有效电平（高电平或低电平），其余输出为相反电平。即通用译码器的每个输出信号唯一对应了一组输入代码，当某个输出有效时，说明输入一定是其对应的输入代码，输入代码和输出代码的对应关系一般由译码器的功能表给出。将 n 位的二进制输入代码转换成与之一一对应的 2^n 个输出信号，称为完全译码器，它常用于计算机中对各种接口地址或存储器地址的译码，因此也称为“唯一”地址译码器。如 3 线-8 线、4 线-16 线、n 线-2^n 线译码器等。通用译码器的输入不限于自然二进制码，还可以是 8421BCD 码和十六进制码等，比如，7442 为 4 线-10 线的 BCD 译码器，74154 为 4 线-16 线的十六进制译码器。

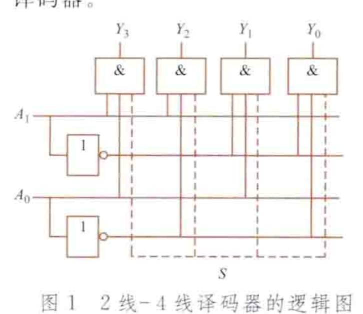


图 1　2 线-4 线译码器的逻辑图

图 1 是 2 线-4 线译码器的逻辑图，A_1、A_0 是输入代码，Y_3、Y_2、Y_1、Y_0 是输出代码。由表 1 可见，当 A_1、A_0 为任一代码时，Y_3、Y_2、Y_1、Y_0 中仅有一个输出是 1（即该译码器输出逻辑 1 有效），其他为无效 0 状态，因而可以分别用每个输出 1 状态作为对应输入代码的译码输出。有些译码器输出为逻辑 0 有效。

表 1　图 1 电路的功能表

A_1	A_0	Y_3	Y_2	Y_1	Y_0
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

图 1 中的虚线 S 是附加控制信号，$S=1$ 时译码器工作，$S=0$ 时译码器被禁止工作，每个输出都停留在逻辑 0 状态。如果把 S 作为数据输入，A_1、A_0 作为地址输入，则此电路又是一个多路分配器。

显示译码器　将要显示的数转换为液晶显示器（LCD）（见液晶显示器件）、发光二极管（LED）、荧光数码管等需

要的发光信息的一种代码转换器件。与通用译码器的输出不同，显示译码器一般有多个输出同时有效。常见的七段字形译码器（也称为七段译码器）就是一例，它的作用是将8421BCD码翻译为七段字形显示器（也称为七段数码管）显示对应十进制数时需要的七段信息。

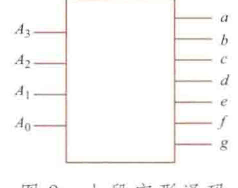


图2　七段字形译码器的图形符号

图2是七段字形译码器的图形符号，图3为七段数码管的示意图。表2是某七段译码器的功能表，输入为四位8421BCD码，输出为七段数码管 a、b、c、d、e、f、g 的驱动信号，由这些信号驱动七段数码管各段，则可以显示对应十进制数的字形。比如，当 $A_3A_2A_1A_0=0101$（表示十进制的5）时，七段译码器的输出代码 $abcdefg=1011011$，即 a、c、d、f、g 为1，数码管上对应的各段被点亮即显示出5的字形。可见，该七段译码器输出为高电平有效。七段译码器的输出为高电平有效时，驱动共阴极（见发光二极管）接法的七段数码管；七段译码器的输出为低电平有效时，驱动共阳极接法的七段数码管。

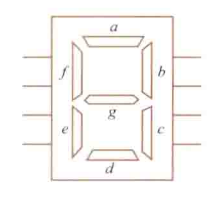


图3　七段数码管示意图

表2　七段译码器的功能表

十进制数	A_3	A_2	A_1	A_0	a	b	c	d	e	f	g	字形
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	2
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	3
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	5
6	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	6
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	9

yintewang

因特网

（internet）　见互联网。

yinji dianzi fashe

阴极电子发射

（electron emission from cathode）　阴极发射电子的过程。在气体放电中阴极提供电子，维持了电流的循环。在金属阴极中，电子可以自由运动。在阴极表面，由于电子和晶格离子之间静电力的作用形成势垒，使电子不能离开电极表面。为了克服表面势垒的阻碍，把电子移到阴极之外，需要施加逸出功（或称为功函数）$e\phi$。逸出功决定于阴极的材料和表面状态。给电子提供能量，把电子从阴极中释放出来的方式有光电发射、热发射、场致发射、二次电子发射等。

光电发射　波长足够短的电磁辐射入射到阴极表面而引起的阴极电子发射。光电发射的条件为

$$h\nu = hc/\lambda \geq e\phi$$

式中 h 为普朗克常数；ν 为光频率；c 为光速；λ 为光波波长；$e\phi$ 为逸出功。

对应于逸出功 $e\phi$ 的入射光的临界波长 λ_c 为

$$\lambda_c = hc/e\phi = 12\,400/e\phi \quad \text{Å}$$

对于大多数的纯金属，λ_c 处在紫外光谱区域，其光电发射系数（一个入射光子产生的光电子数）约在 $10^{-3}\sim10^{-4}$ 的范围。光电器件就利用了光电发射效应。在光电器件的阴极表面涂上一层氧化物或合金，使 λ_c 落在可见光区甚至红外区，其光电发射系数也大大增加。

热发射　由于温度升高而引起的阴极表面电子发射。在室温下，只有极少数的电子，它的能量超过金属表面势垒，可从阴极表面离开。当把阴极加热到1500～2500K时，将有一部分电子具有足够的能量，穿过势垒而从表面发射出来。在真空中，表面热发射的饱和电流密度 j_s 用里查得逊（Richardson）公式表示

$$j_s = AT^2\exp(-e\phi/kT) \quad \text{A/m}^2$$

式中 k 为玻耳兹曼常数；A 为与材料种类有关的常数，如钨的 A 值为 $7.0\times10^5\,\text{A/(m}^2\cdot\text{K}^2)$；$e\phi$ 为4.5eV。在温度 $T=2500$K 时，$j_s=3.8\times10^3\,\text{A/m}^2$。

场致发射　由于外加强电场而引起的阴极表面电子发射。在外加强电场的作用下，阴极中部分电子“穿过”势垒而从表面发射出来。按照量子力学理论，处于位阱中的电子，即使它的能量不超过势垒的势能，也有一定的概率穿过势垒而跑掉，这就是所谓的“隧道效应”。在强电场的作用下，势垒的形状变窄变低，电子就容易穿过势垒而从表面发射出来。对于一定的金属，其场致发射电流密度可根据波动力学，用福勒-诺得海姆（Fowler-Nordheim）公式进行计算。

在气体放电过程中，如果在电极表面有氧化物绝缘薄层，正离子会积聚在其上，形成高达 10^8 V/m 的强电场，引起场致发射，这种现象称为马尔特（Malter）效应。

二次电子发射　由正离子、受激励的中性原子和分子轰击阴极表面而引起的电子发射。正离子从阴极轰击出电子，必须由一个正离子至少轰击出两个电子，其中一个用于中和正电荷，另一个为自由电子。因此，正离子所具有的动能 W_k 和势能 W_p 之和应大于逸出功 $e\phi$ 的2倍，即

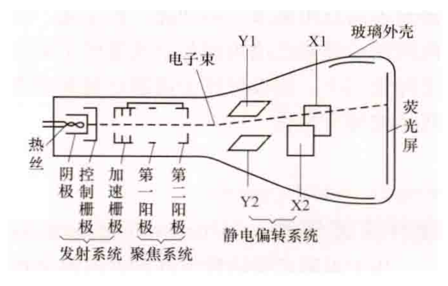
$$W_k + W_p \geq 2e\phi$$

正离子轰击阴极表面是主要的二次电子发射机制。中性粒子的轰击对二次电子发射的作用较小。

yinji shexian shiboguan

阴极射线示波管

（cathode-ray oscilloscope tube）　使电子束能在荧光屏的一个很小面积上聚焦，并能改变其位置和强度以得到可见光学图形的一种真空电子器件。示波管显示的图形特性与加到它的输入信息（一个或几个电信号）有关。它广泛应用于示波器和雷达中。阴极射线示波器是一种具有阴极射线示波管，通



阴极射线示波管结构示意图

过荧光屏显示波形来观察周期性的或瞬态的可变电量的仪器。

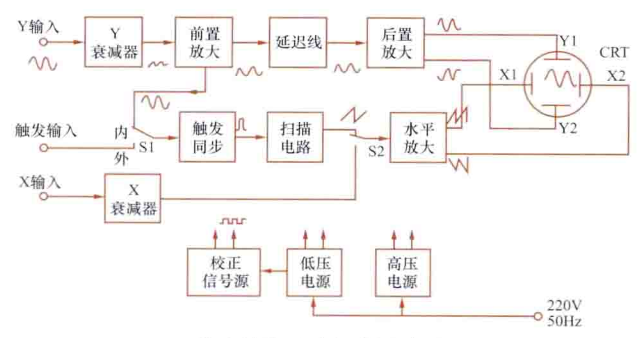
阴极射线示波管的结构示意图如图所示。管内保持 10^{-5}～5×10^{-6} Pa 的真空度。电子枪用来产生电子束，并对其进行控制和聚焦。电子枪由电子发射系统和聚焦系统组成。发射系统包括热丝、阴极、控制栅极和加速栅极。当电流通过钨丝（热丝）使外涂发射材料的镍筒（阴极）加热并保持约 1050K 时，阴极将发射电子。加速栅极上的电压决定着从阴极拉出的受空间电荷限制的电流的大小。当控制栅极电位变得较负时，电子束电流下降。在构成聚焦系统的第一阳极和第二阳极上分别加电压就形成了电子透镜。电子透镜的作用是将电子束聚焦成很细的束打到荧光屏上产生光点。静电偏转系统是利用静电场对运动电子的作用使电子束偏转。静电偏转系统由对称于电子枪轴线的两对互相垂直的偏转板构成。一对偏转板使电子束水平偏转，另一对使其垂直偏转。在水平偏转板（X1、X2）上加扫描锯齿波电压，垂直偏转板上（Y1、Y2）加被观察的电压信号，就可在荧光屏上显示出被观察信号的光学图形。荧光屏上涂有受电子束激发而发光的荧光粉层。荧光屏的作用是将电能转变为可见光。

yinji shexian shiboqi

阴极射线示波器

（cathode-ray oscilloscope） 在阴极射线示波管的荧光屏上显示一条或多条瞬时变化电位差曲线的仪器，又称电子示波器。如希望用它显示其他瞬时变化的物理量，应事先转化为电位差。

阴极射线示波器的主要部件为阴极射线示波管（图中 CRT）。由电子枪形成的电子束受加在偏转板 X1、X2 和 Y1、Y2 上电位差的控制，沿水平和垂直两个方向运动，射在荧光屏上形成一定的轨迹。通常将与时间成正比的电位差加到水平偏转板（X1、X2）上，用以产生扫描线；而将随时间变化的被测电位差信号加到垂直偏转板（Y1、Y2）上，如此，即可显示出被测信号随时间变化的波形。



阴极射线示波器原理框图

示波器是进行科学研究和工程实验必备的显示仪器。为满足不同应用需求，多功能、数字化、可存储、更智能、可联网的示波器已成为现代示波器的主要技术性能和特征。在实际使用中，阴极射线示波器已被数字存储示波器等多种现代示波器所替代。

yingjian miaoshu yuyan

硬件描述语言

（hardware description language，HDL） 用文本形式描述数字电路的内部结构与信号连接关系的一类语言，类似于一般的计算机高级语言的语言形式和结构形式。设计者可以利用 HDL 描述要设计的电路，然后利用 EDA（electronic design automation，EDA）工具进行综合（把 HDL 描述的系统转化成硬件电路信息）和仿真（模拟检测），最后形成目标文件，下载到可编程逻辑器件（programmable logic device，PLD）（见可编程逻辑器件）实现设计的电路。使用 HDL 可以从上层到下层（从抽象到具体）逐层描述数字电路系统，用一系列分层次的模块表示十分复杂的数字系统。

发展 硬件描述语言已有近 30 年的发展历史，成功地应用于数字系统设计、仿真、综合和验证等各阶段，使设计过程达到高度自动化。20 世纪 80 年代，已出现了上百种硬件描述语言，它们各有所长，但众多的语言令使用者无所适从。因此，需要一种面向设计的多领域、多层次以及普遍认同的标准硬件描述语言。20 世纪末，超高速集成电路硬件描述语言（very-high-speed integrated circuit hardware description language，VHDL）和 Verilog HDL 语言适应了这种要求，先后成为 IEEE 标准。

VHDL 1987 年被 IEEE 确认为标准硬件描述语言。自 IEEE 公布了 VHDL 的标准版本 IEEE 1076—1987 后，各种 VHDL 设计环境、设计工具和 VHDL 接口被相继推出。1993 年，IEEE 修订了 VHDL，从更高的抽象层次和系统描述能力上扩展了 VHDL 的内容，公布了 IEEE 1076—1993 版本。与 Verilog HDL 相比，VHDL 语言具有更强的行为描述能力，有丰富的仿真语句和库函数，但 VHDL 入门较难。

Verilog HDL 1995 年被 IEEE 确认为标准硬件描述语言，即 Verilog HDL 1364—1995；2001 年发布了 Verilog HDL 1364—2001 标准。在此标准中，加入了 Verilog HDL-A 标准，使 Verilog 有了模拟设计描述的能力。Verilog HDL 更适合 RTL（register tansfer level）和门电路的描述，是一种可描述较低设计层次的语言，故较为容易控制电路资源，常用在专业的集成电路设计上。Verilog HDL 具有 C 语言的描述风格，是一种较容易掌握的语言。

应用 可用于系统仿真与硬件实现。如果描述语言程序只用于仿真，几乎所有的语法和编程方法都可以使用。如果程序是用于硬件实现，必须保证程序“可综合”，即程序的功能可以用硬件电路实现。不可综合的 HDL 语句在软件综合时将被忽略或者报错。所有 HDL 描述都可以用于仿真，但不是都能用硬件实现。HDL 的可移植性好，使用方便，但效率不如原理图；原理图输入的可控性好，效率高，比较直观。使用 PLD 设计复杂系统时，一般采用原理图与 HDL 结合的方法。

yongci cailiao

永磁材料

（permanent magnetic materials；magnetically hard materials） 具有高矫顽力的磁性材料，亦称硬磁材料。其特点是：剩磁高，矫顽力强，磁滞回线的矩形比，即 B_r/B_m 大，面积大，主要用于制造永久磁铁。通常用最大磁能积 $(BH)_{max}$ 来衡量永磁材料单位体积内所贮藏的磁能，用来判断永磁材料的优劣。常用的永磁材料有铝镍钴磁钢、永磁铁氧体和稀土钴磁钢等。

（1）铝镍钴磁钢：最常用的磁钢。

（2）永磁铁氧体：有钡铁氧体和锶铁氧体两种。铁氧体的剩磁虽较低，但矫顽力很强。

（3）稀土钴磁钢：特性优良，最大磁能积大。

永磁材料广泛用于电机、仪表、电子、机械、通信、医疗及家用电器等各个领域中，如用于制造永磁电机的磁极、电话受话器、扬声器、磁电系仪表、磁性轴承、磁分离器、磁控管等。

youzhong yanmian fangdian

油中沿面放电 (surface discharge in dielectric oil)

绝缘油中沿着油和固体电介质分界面发生的电晕、滑闪、闪络放电现象。油中沿面放电的规律与气体中的沿面放电相似。通常，这种放电现象发生在分界面处的油中，仅当固体电介质质量不高时，才会在固体介质表层内部发生放电。根据分界面附近的电场分布情况，油中沿面放电有两种类型：弱垂直场强分量沿面放电及强垂直场强分量沿面放电。

弱垂直场强分量沿面放电　电场强度几乎与油和固体电介质分界面平行、垂直分量很小时的油中沿面放电现象。固体电介质的存在并不改变电极间油击穿的路径，沿面闪络电压与纯油间隙击穿电压相比下降不多。增加极间距离，改善电场分布，可提高油中沿面闪络电压。固体电介质受潮后，沿面闪络电压下降。

强垂直场强分量沿面放电　电场强度与油和固体电介质分界面斜交、垂直分量较大时的油中沿面放电现象。固体电介质的存在改变了电极间油击穿的路径。由于电场强度不仅有沿面分量，而且有较大的垂直分量，所以放电发展过程中会出现滑闪放电现象。出现滑闪后，放电迅速发展，很快导致闪络。这种情况下，增加电极间的沿面距离，沿面闪络电压提高并不显著。采用使滑闪放电起始电压升高的措施，可提高油中沿面闪络电压。

沿绝缘油和固体电介质分界面发生放电时，不仅绝缘油会劣化变质，固体材料表面损坏也是常有的现象。开始时，放电只在油中发生，放电产生的热作用和剧烈的压力变化使固体电介质内产生气泡。在一次次放电的作用下，固体电介质会出现分层、开裂现象，此时放电有可能发生在固体电介质内部，使其绝缘的击穿电压下降。

youxiaozhi

有效值 (effective value)

在规定的时间间隔内，一个量的各瞬时值的平方的平均值的平方根值，又称为方均根值（rms）。对于周期量，时间间隔为一个周期。以周期电压 $u(t)$ 为例，它的有效值为

$$U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\,\mathrm{d}t}$$

有效值是周期量的一个主要数字特征量。例如家用电器的额定电压为220V，便是指的有效值。

正弦量的有效值　以正弦电压为例：$u(t)=U_m\cos(\omega t+\varphi)$，式中 U_m、ω 和 φ 分别为最大值、角频率和初相位，则有效值 $U=U_m/\sqrt{2}$。

非正弦周期量的有效值　非正弦周期量的有效值等于它的直流分量、基波和各次谐波有效值平方之和的平方根值。若将直流分量和基波分别当作零次和一次谐波看待，U_n 为第 n 次谐波的有效值，则非正弦电压的有效值 U 为

$$U=\sqrt{U_0^2+U_1^2+U_2^2+U_3^2+\cdots}=\sqrt{\sum_{n=0,1,\cdots}U_n^2}$$

对于非正弦电流的有效值 I 也有类似的关系式

$$I=\sqrt{I_0^2+I_1^2+I_2^2+I_3^2+\cdots}=\sqrt{\sum_{n=0,1,\cdots}I_n^2}$$

youyuan lüboqi

有源滤波器 (active filter)

由RC无源网络和集成运算放大器组成的具有滤波功能的放大电路。它只允许一定频率范围内的信号通过，而对该频率范围外的信号加以阻止或削弱。允许通过的信号频率范围称为通带，被阻止或削弱的信号频率范围称为阻带；通带和阻带的边界频率称为截止频率。有源滤波器广泛应用于自动控制、信号处理和检测仪表中，是应用极为普遍的电子电路之一。

有源滤波器按幅频特性可以分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器；根据由通带缓变到阻带的衰减率又可将上述各种滤波器分为一阶、二阶或更高阶的滤波器。理想的有源滤波器在通带内应有相同的增益，在阻带内应有零增益。

低通滤波器　其幅频特性如图1（a）所示。当 $f<f_h$ 时为通带；当 $f>f_h$ 时为阻带。f_h 称上限截止频率。$|A|$ 为增益的幅值。通带的带宽 $BW=f_h$。

高通滤波器　其幅频特性如图1（b）所示。当 $f>f_l$ 时为通带，当 $f<f_l$ 时为阻带。f_l 称下限截止频率。通带的上限截止频率理论上为 $f_h=\infty$，但是，由于运算放大器的实际带宽不可能为无穷大，所以，高通滤波器的带宽也是有限的。

带通滤波器　其幅频特性如图1（c）所示。当 $f_l<f<f_h$ 时为通带，其余为阻带。带宽 $BW=f_h-f_l$，中心频率为 $f_0=(f_l+f_h)/2$。

带阻滤波器　其幅频特性如图1（d）所示。它含一个阻带和两个通带。当 $f_l<f<f_h$ 时为阻带；当 $f<f_l$ 和 $f>f_h$ 时为通带。如前所述，由于运算放大器的带宽有限，故 $f>f_h$ 这个通带范围也是有限的。此外，阻带的中心频率为 $f_0=(f_h+f_l)/2$。

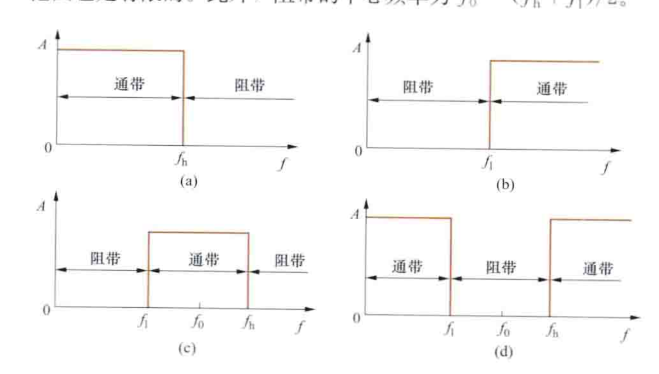


图1　有源滤波器的理想幅频特性

（a）低通；（b）高通；（c）带通；（d）带阻

在图1所示各种滤波器的幅频特性中，通带与阻带的交越处均为阶跃跳变，实际的幅频特性都有一个缓变过程，交越处的缓变速度和滤波器的阶数有关。

一阶低通有源滤波器　图2（a）为一阶低通有源滤波器电路图。由 R、C 组成一阶无源滤波网络，运算放大器接成同相输入放大电路。由于同相输入放大电路具有极高的输入电阻和很低的输出电阻，故运算放大器在信号源 U_i 与滤波器的负载之间起缓冲和放大作用。

图2（a）中，同相输入端的电压 $U_p(s)=\dfrac{1/sC}{R+1/sC}U_i(s)$，

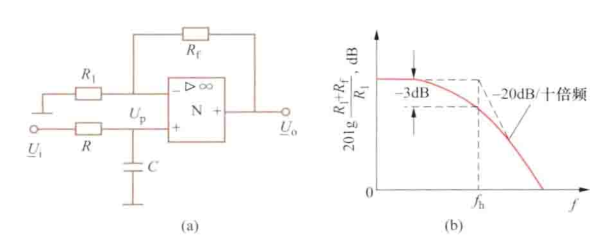


图 2　一阶低通有源滤波器

(a) 电路图；(b) 幅频特性伯德图

运算放大器的输出电压为 $U_o(s)=\frac{R_1+R_f}{R_1}U_p(s)$。其传递函数为

$$A_f(s)=\frac{U_o(s)}{U_i(s)}=\frac{R_1+R_f}{R_1}\times\frac{1}{1+sRC} \qquad (1)$$

式（1）用频域表示，即用 $j2\pi f$ 代替 s，且令 $2\pi f_h=1/RC$，得 A_f 的幅值为

$$|A_f(f)|=\frac{R_1+R_f}{R_1}\times\frac{1}{\sqrt{1+(f/f_h)^2}} \qquad (2)$$

$f_h=\frac{1}{2\pi RC}$ 为上限截止频率。由式（2）可见：当 $f=0$ 时，滤波器的直流增益为 $20\lg|A_f(0)|=20\lg\left(\frac{R_1+R_f}{R_1}\right)$dB；当 $f=f_h$ 时，滤波器的实际增益为 $20\lg|A_f(f_h)|=20\lg\left(\frac{R_1+R_f}{\sqrt{2}R_1}\right)$dB。图 2（b）为按式（2）画出的幅频特性伯德图，实线所示曲线为实际的幅频特性，虚线所示的折线为近似的幅频特性；当 $f=f_h$ 时，两者相差 3dB，由通带缓变到阻带的衰减率为 -20dB/十倍频，常记作 -20dB/dec。图 2（a）之所以称为一阶低通有源滤波器电路是因为它的传递函数［式（1）］中的分母运算子 s 为一次方的缘故。

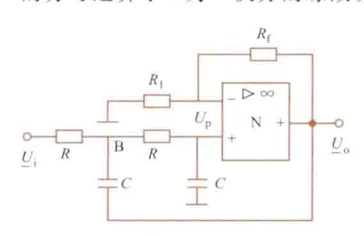


图 3　二阶低通有源滤波器电路图

二阶低通有源滤波器　一阶低通有源滤波器中通带缓变到阻带的衰减率为 -20dB/dec，在有些情况下是不够的。如果要求衰减得更快些，如 -40dB/dec，这时就要采用二阶有源滤波器，如图 3 所示。其传递函数为

$$A_{uf}(s)=\frac{U_o(s)}{U_i(s)}=\frac{A_{up}(1/RC)^2}{s^2+(3-A_{up})(1/RC)s+(1/RC)^2} \qquad (3)$$

式中 $A_{up}=\frac{R_1+R_f}{R_1}$。令 $\omega_0=1/RC$ 和 $\alpha=3-A_{up}$，则式（3）可写成

$$A_{uf}(s)=\frac{A_{up}\omega_0^2}{s^2+\alpha\omega_0 s+\omega_0^2} \qquad (4)$$

式中 α 称为阻尼系数，ω_0 称为固有频率或谐振频率。因式（4）分母中的运算子 s 为二次方，故称为二阶有源滤波器。

设式（4）的特征方程 $s^2+\alpha\omega_0 s+\omega_0^2=0$ 的两个根为 p_1 和 p_2，则 $s^2+\alpha\omega_0 s+\omega_0^2=(s-p_1)(s-p_2)$，而

$$p_{1,2}=-\frac{\alpha\omega_0}{2}\pm\frac{\omega_0}{2}\sqrt{\alpha^2-4} \qquad (5)$$

式（5）有下列三种情况：

（1）当 $\alpha=2$ 时，$p_{1,2}=-\omega_0$ 为两个重实根。式（4）可写成 $A_{uf}(s)=\frac{A_{up}\omega_0^2}{(s+\omega_0)(s+\omega_0)}$，显然，它相当于两个时间常数相同的一阶低通有源滤波器串联。

（2）当 $\alpha>2$ 时，$p_{1,2}=-\frac{\alpha\omega_0}{2}\pm\omega_0\sqrt{(\alpha^2/4)-1}$ 为两个不重合的实根。它相当于两个时间常数不同的一阶低通有源滤波器串联。

（3）当 $\alpha<2$ 时，$p_{1,2}=-\frac{\alpha\omega_0}{2}\pm j\omega_0\sqrt{1-\frac{\alpha^2}{4}}=\sigma\pm j\omega_d$，为一对共轭根。式（4）写成象函数为

$$A_{uf}(s)=\frac{1}{(s-\sigma-j\omega_d)(s-\sigma+j\omega_d)}=\frac{1}{(s-\sigma)^2+\omega_d^2}$$

上式对应的原函数为

$$A_{uf}(t)=\frac{1}{\omega_d}e^{\sigma t}\sin\omega_d t \qquad (6)$$

式（6）表明图 3 所示电路能稳定工作的必要条件是 σ 必须为负值，否则，$e^{\sigma t}$ 将越来越大，电路将进入增幅振荡而不能正常工作。因 $\sigma=-\frac{1}{2}\alpha\omega_0$，故 $\alpha=3-A_{up}$ 必须为正值，即 $A_{up}<3$。

式（4）所示的幅频特性伯德图如图 4 所示。阻尼系数 α 的值不同，-3dB 的带宽和增益的峰值也就不同。

图 3 电路中，左边的电容之所以接到运算放大器的输出端而不接地，是因为这样可以在 $\omega/\omega_0=1$ 附近，由于相位移的变化，引入一定值的正反馈，从而提高了增益，拓宽了幅频特性的平坦部分，展宽了 -3dB 频带宽。

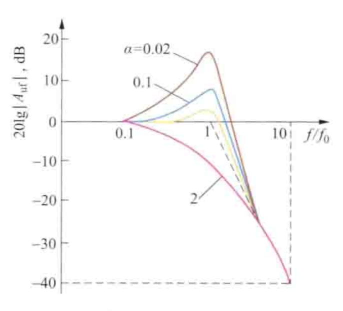


图 4　二阶低通有源滤波器幅频特性伯德图

由图 4 可以看出，由通带变到阻带的增益衰减率为 -40dB/dec，较一阶时增加了一倍。如果要求有更快的衰减率，可采用 3 阶、4 阶或更高阶的滤波器。高阶滤波器一般都由一阶或二阶的滤波器串联组成。

二阶高通有源滤波器　把图 3 中的电阻 R 和电容 C 的位置互换，就构成了二阶高通有源滤波器，如图 5（a）所示。设运算放大器为理想元件，则 $A_{up}=\frac{U_o}{U_p}=1+\frac{R_f}{R_1}$，传递函数为

$$A_{uf}(s)=\frac{U_o(s)}{U_i(s)}=\frac{A_{up}s^2}{s^2+\alpha\omega_0 s+\omega_0^2} \qquad (7)$$

式中 $\alpha=3-A_{up}$；$\omega_0=1/RC$。

二阶带通有源滤波器　电路如图 5(b) 所示。它是由一个高通和一个低通有源滤波器串联组成。R_1、C_2 组成低通网络，C_1、R_3 组成高通网络。图 5(b) 所示电路的传递函数为

$$A_{uf}(s)=\frac{U_o(s)}{U_i(s)}=A_{up}\left(\frac{1}{R_1C_2}\right)s\Big/\left\{s^2+s\left[\frac{1}{R_3C_1}+\frac{1}{R_3C_2}+\frac{1}{R_1C_2}+\frac{1}{R_2C_2}(1-A_{up})\right]+\frac{R_1+R_2}{R_1R_2R_3C_1C_2}\right\} \qquad (8)$$

式中 $A_{up}=1+\frac{R_f}{R_1}$；$\omega_0^2=\frac{R_1+R_2}{R_1R_2R_3C_1C_2}$（$\omega_0$ 称为中心频率）；$\alpha=\frac{R_1R_2(C_1+C_2)+C_1R_3[R_2+R_1(1-A_{up})]}{\sqrt{R_1+R_2}\sqrt{R_1R_2R_3C_1C_2}}$。

图 5　二阶有源滤波器电路图

（a）高通滤波器；（b）带通滤波器；（c）带阻滤波器

二阶带阻有源滤波器　电路如图 5（c）所示。它是由一个双 T 网络和一个运算放大器组成，双 T 网络起选频作用。输入信号 U_i 和选频网络的输出电压 U_p 之间的关系为：当频率较低时，2C 的容抗极大，故 U_i 经过两个 R 传输到 U_p，因运算放大器系同相输入接法，其输入阻抗远大于 2R，故 $U_p \approx U_i$。当频率较高时，由于两个串联的电容的容抗几乎为零，故 $U_p \approx U_i$。当频率等于中心频率 ω_0 时，U_i 与 U_p 间的等效阻抗变得很大，使得 $U_p \approx 0$，从而使 ω_0 附近的信号不能通过双 T 网络，U_o 中自然不包含 ω_0 附近的信号分量，呈带阻状态，经推导可得

$$A_{uf}(\omega)=\frac{U_o(\omega)}{U_i(\omega)}=\frac{A_{up}[1+(j\omega/\omega_0)^2]}{1+\alpha j\omega/\omega_0+(j\omega/\omega_0)^2} \tag{9}$$

式中 $A_{up}=1+\dfrac{R_f}{R_1}$；$\alpha=2(2-A_{up})$。

二阶有源滤波器有各种各样的电路。其传递函数的一般表达式为

$$A_{uf}(s)=\frac{b_0 s^2+b_1 s+b_2}{s^2+a_1 s+a_2} \tag{10}$$

从式（10）可归纳出：

（1）分母中各系数 a_1、a_2 必须为正，否则系统不稳定；a_1、a_2 的数值决定了滤波器的性能。

（2）分子中各系数 b_0、b_1、b_2 之值决定了滤波器的类型：①$b_0 \neq 0$，$b_1=b_2=0$ 时，为高通滤波器；②$b_0=b_2=0$，$b_1 \neq 0$ 时，为带通滤波器；③$b_0 \neq 0$，$b_2 \neq 0$，$b_1=0$ 时，为带阻滤波器；④$b_0=b_1=0$，$b_2 \neq 0$ 时，为低通滤波器；⑤$b_0 \neq 0$，$b_1 \neq 0$，$b_2 \neq 0$ 时，为全通滤波器。

yumen

与门　（AND gate）　实现与逻辑关系的门电路。它是一种常用的逻辑门。

若决定某一件事的所有条件都成立，这件事就发生，否则就不发生，这种逻辑关系称为“与逻辑”。（见逻辑函数）

图 1 中灯 HW 亮的条件是开关 S1 和 S2 都闭合。若以 $A=1$、$B=1$ 分别表示开关 S1、S2 闭合，$A=0$、$B=0$ 分别表示开关 S1、S2 断开，$L=1$ 表示灯亮，$L=0$ 表示灯灭，则可列出输入变量 A、B 的各种取值组合与输出变量 L 的对应关系。描述输入变量取值的所有组合与输出变量取值对应关系的表格称为真值表（见逻辑函数），与逻辑的真值表如表所示。

与逻辑的真值表

A	B	L
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

从表中可以看出：L 为真（即 $L=1$）的条件，是 A 与 B 都为真（即 $A=1$，且 $B=1$）。与逻辑的表达式为 $L=A \cdot B$ 或 $L=AB$，读作 L 等于 A 与 B。与逻辑门的输入变量可扩展到 2 个以上。

由二极管构成的与门电路及其图形符号如图 2 所示。

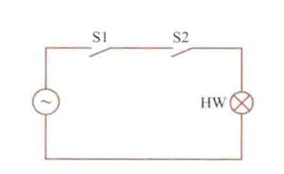


图 1　与逻辑电路

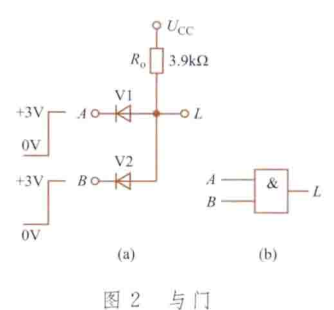


图 2　与门

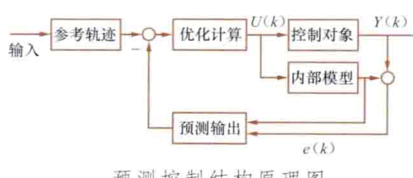
（a）电路；（b）图形符号

yuce

预测　（forecasting）　见卡尔曼滤波。

yuce kongzhi

预测控制　（predictive control）　基于参数和非参数模型，采用局部优化策略，对优化窗口不断滚动，对实际输出和模型输出不断比较并反馈校正，以实现跟踪参考值的一种控制方法。预测控制是一种基于模型的先进控制技术，又称模型预测控制（model predictive control），是 20 世纪 70 年代中后期在欧美工业领域出现的一种新型计算机控制算法。其基本思想是：以预测模型为基础，采用在线滚动优化性能指标和反馈校正的策略，克服受控对象建模误差和结构、参数以及环境等不确定因素的影响。其有效地弥补了现代控制理论方法对复杂受控对象所无法避免的有效控制的不足。典型的预测控制结构原理如图。



预测控制结构原理图

主要特点

（1）多样性。注重的是模型功能而非结构形式，只要是具有预测功能的受控对象模型，无论采用什么样的描述形式，均可作为预测模型。

（2）时变性。采用有限时长内的滚动优化策略，而不是常规最优控制中固定的全局目标。滚动优化不是一次离线完成运算，而是反复在线进行。在线算法这种时变性虽然在每一时刻只能得到全局次优解，但却能对模型失配、时变与干扰等引起的不确定性进行及时补偿，从而保证优化的实际效果。

（3）鲁棒性。可将系统输出的动态预估问题分解为预测模型的输出预测和基于偏差的预测校正两部分。由于预测模型不可能与实际对象完全相符，预测模型的输出与实际输出必然存在偏差，将此偏差作为反馈值进行在线校正，使系统具有负反馈功能，从而提高预测控制系统的鲁棒性。

基本类型　①以非参数模型为模型的预测控制。主要基于有限阶跃响应模型的动态矩阵控制和基于有限脉冲响应模型的模型算法控制。特点是建模简单，但仅局限于开环自稳定对象。

②基于结构设计的预测控制。包括内模控制、推理控制和基于状态空间的模型，是从结构上研究预测控制的一个分支。

发展　早期研究的重点主要集中在：理论分析、算法改进及推广以及算法分析与比较。目前预测控制已突破了早期单调算法研究的框架，开始了与极点配置、自适应控制、鲁棒控制等相结合的一系列先进预测控制策略研究，产生了极点配置预测控制、解耦预测控制、前馈补偿预测控制、自适应预测控制、广义预测控制和鲁棒预测控制等新方法；同时，通过与智能控制技术的结合，产生了模糊预测控制、神经元网络预测控制、遗传算法预测控制及自学习预测控制等；通过将人工智能、大系统递阶原理等引入到预测控制，构成多层智能预测控制模式，进一步增强了预测控制处理复杂对象、复杂任务和复杂环境的能力。

参考书目

诸静，等．智能预测控制及其应用．杭州：浙江大学出版社，2002.

yuansu bandaoti cailiao

元素半导体材料　(element semiconductor materials)

由单一元素组成的半导体材料。元素周期表中有 12 种元素具有半导体性质，它们是 B、C、Si、Ge、灰－Sn、P、灰－As、黑－Sb、S、Se、Te、I，但大多数是不稳定的或制备困难，只有锗（Ge）、硅（Si）性质优越，是广泛应用的半导体材料。此外，硒（Se）也有一定的实用价值。

硅、锗是最重要的典型半导体材料，均属金刚石型结构，晶格常数分别为 0.5431nm 和 0.5658nm，都是间接带隙半导体。室温下，禁带宽度E_g：硅为 1.12eV；锗为 0.67eV。本征载流子浓度：硅为 $1.5\times10^{10}/cm^3$，锗为 $2.25\times10^{13}/cm^3$。高纯硅、锗的漂移迁移率分别为$\mu_e=1350cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$、$\mu_p=480cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$ 和 $\mu_e=3900cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$、$\mu_p=1900cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$，其中$\mu_e$、$\mu_p$分别表示电子迁移率和空穴迁移率。本征电阻率：硅为 $2.5\times10^3\Omega\cdot m$；锗为 $0.47\Omega\cdot m$。

硅和锗中掺入施主或受主杂质后可形成以电子导电为主的 N 型或以空穴导电为主的 P 型半导体材料，某些浅施主和浅受主杂质电离能如表所示。

硅、锗半导体中浅杂质的电离能（eV）

半导体	施主				受主			
	P	As	Sb	Li	B	Al	Ga	In
硅	0.044	0.049	0.039	0.033	0.045	0.057	0.065	0.16
锗	0.0126	0.0127	0.0096	0.0093	0.01	0.01	0.011	0.011

此外，还有许多元素如铜、银、金、锌、镉、磷、硒、碲在硅、锗中形成若干个深能级，起复合中心或陷阱的作用。



微机控制的扩散炉

硅、锗熔点分别为 1412℃和 958℃。通过化学提纯、物理提纯后，可用直拉法、区域熔化等方法制成单晶体，通过扩散、离子注入等方法制备 PN 结，以制作各种半导体器件和集成电路。

硒有非晶态、单斜晶系晶态红硒和六方晶系晶态灰硒三种同素异形体，其熔点为 220℃，加热至 180～220℃均形成最稳定的六方晶体。晶格常数 $c=0.496$nm，$a=b=0.436$nm。非晶态硒基本为绝缘体，禁带宽度E_g为 1.8eV，电阻率约为 $10^3\Omega\cdot m$，迁移率约 $1cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$，掺杂后电阻率可降到 $10\Omega\cdot m$。硒可用作整流器，利用其光电效应可制作光电池和电子照相用的硒鼓。

图为微机控制的扩散炉。

yunjisuan

云计算　(cloud computing)

通过网络统一组织和灵活调用各种信息资源，实现大规模计算的信息处理方式。云计算利用分布式计算和虚拟资源管理等技术，通过网络将分散的信息资源（包括计算、存储、软件等）集中起来形成共享的资源池，并以动态按需和可度量的方式向用户提供服务。提供服务的资源池被称为“云”。

云计算有四个方面的核心特征：①宽带网络连接，“云”不在用户本地，用户要通过宽带网络接入“云”中并使用服务，“云”内节点之间也通过内部的高速网络相连。②对信息资源的共享，“云”内的信息资源并不为某一用户所专有。③快速、按需、弹性的服务，用户可以按照实际需求迅速获取或释放资源，并可以根据需求对资源进行动态扩展。④服务可测量，服务提供者按照用户对资源的使用量进行计费。

发展　“云计算”最早由 Kenneth K Chellapa 教授提出，1997 年在美国达拉斯召开的 Informs 学术会议中进行了以下描述：“云计算是一种计算方式，计算边界将由经济学原理而不是技术限制来确定”。2006 年 3 月，亚马逊（Amazon）推出弹性计算云（elastic compute cloud，EC2）服务。2006 年 8 月 9 日，Google 首席执行官埃里克·施密特（Eric Schmidt）在搜索引擎大会（SES San Jose 2006）进一步提出“云计算”的概念。Google“云端计算”源于 Google 工程师克里斯托弗·比希利亚所做的“Google 101”项目。随后，IBM、雅虎、惠普、英特尔等厂商纷纷发布自己的云计算定义。经过多年总结，美国国家标准与技术研究院（NIST）对云计算做出正式定义：云计算是一种能够通过网络以便利的、按需付费的方式获取计算资源（包括网络、服务器、存储、应用和服务等）并提高其可用性的模式，这些资源来自一个共享的、可配置的资源池，并能够以最省力和无人干预的方式获取和释放。

分类　按照服务对象的不同，云计算一般分为公有云和私有云两大类。前者指的是面向广域范围内的服务对象的云计算服务，一般具有社会性、普遍性和公益性等特点；而后者一般是指社会单位为自身需要所建设的自有云计算服务模式，一般具有行业性特点。

按照层次的不同，云计算一般可分为基础设施即服务（infrastructure as a service，IaaS），平台即服务（platform as a service，PaaS）和软件即服务（software as a service，SaaS）。云计算服务通常提供通用的在线商业应用，该应用的软件和数据可存储在数据中心。

（1）基础设施即服务（IaaS）。消费者通过因特网可以获得完善的计算机基础设施服务。

（2）平台即服务（PaaS）。PaaS 实际上是指将软件研发的平台作为一种服务，以 SaaS 的模式提交给用户。因此，PaaS 也是 SaaS 模式的一种应用。但是，PaaS 的出现可以加

快 SaaS 的发展，尤其是加快 SaaS 应用的开发速度。

（3）软件即服务（SaaS）。它是一种通过 Internet 提供软件的模式，用户无需购买软件，而是向提供商租用基于 Web 的软件，来管理企业经营活动。相对于传统的软件，SaaS 解决方案有明显的优势，包括较低的前期成本、便于维护及快速展开使用等。

云计算可以最大限度地整合现有资源，将计算资源、存储资源、网络资源云化为资源池，为系统提供超级计算能力，可以提高资源利用率、降低能耗、节约成本，是未来计算领域的发展方向。

参考书目

周洪波．云计算：技术、应用、标准和商业模式．北京：电子工业出版社，2011.

吴朱华．云计算核心技术剖析．北京：人民邮电出版社，2011.

yunmu

云母（mica） 一种铝代硅酸盐天然矿物。可分剥成厚度为 0.01～0.03mm 的柔软而富有弹性的薄片。其电气强度高，耐热、耐腐蚀和耐电晕性好。电工上常用的是白云母（$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$）和金云母（$K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$）。白云母的电气绝缘性能优于金云母，而金云母的耐热性优于白云母。图所示为天然云母。除天然云母外，还有人工合成的氟金云母，其成分与金云母类似，只是用氟代替了氢氧基，它由 Al_2O_3、SiO_2、MgO、K_2O、K_2SiF_6 等原料在约 1450℃的温度下熔融后，经缓慢冷却结晶而成。合成云母不含结晶水，纯度高，其耐热性、耐热冲击性和电气绝缘性能均优于天然云母，但价格较高。

优质天然云母蕴藏量少，且剥片加工过程中损失率很高，因此促进了粉云母技术的开发。粉云母是利用天然云母碎片在 750～800℃下煅烧后，再进行酸处理、制浆、抄纸等过程制成，或通过高压水粉碎天然云母，经水洗、抄纸等过程制成。粉云母不仅厚度均匀、性能良好，而且大大提高了云母矿料的利用率，降低了成本。



云母

云母片可直接用作绝缘材料，但更多的是用云母片或粉云母与胶粘剂、补强材料一起制成各种云母制品，包括电机绝缘用的云母带、衬垫或换向器用的云母板、磁极绝缘用的云母箔等。此外，还有由云母粉与低软化温度的硼铅玻璃经热熔、模压、成型而制成的云母玻璃，可用作高压电器的耐弧、耐高温绝缘材料。

yunsuanqi

运算器（arithmetic unit） 计算机中执行各种算术和逻辑运算的部件，亦称算术逻辑部件（arithmetic and logic unit，ALU）。运算器的基本操作包括加、减、乘、除四则运算，与、或、非、异或等逻辑运算以及移位、比较等操作。对一个特定的处理机，运算种类、运算速度和运算精度是运算器及计算机本身性能的综合反映。

分类 运算器的处理对象是数据，数据表示方法和长度直接影响运算器的性能和结构。

按计数制分，有二进制运算器、十进制运算器等；按负数的表示方法分，有原码运算器（符号位与数值部分分别处理）和补码运算器（符号位作为数值的一部分统一处理）；按小数点的表示方法分，有定点数运算器和浮点数运算器。

运算器一次能处理的数据长度（二进制位的个数）是运算器能力的重要标志。一次只能处理一位的，称串行运算器；一次能处理 4 位、8 位、16 位、32 位、64 位的，称并行运算器；若一个完整的数据分成几段处理的，称串-并行运算器；若处理的数据长度是固定的，称定字长运算器；若处理的数据长度不固定，称可变字长运算器。

操作 运算器最基本的操作是加法。由一个并行加法器和一些输入控制门能构成一加/减运算器。将一个数 B 的代码求补，与另一个数 A 相加，即能实现 $A-B$ 的操作。比较操作是通过判断两数相减后的状态而实现的。

左右移位也是运算器的基本操作。在带符号的数中，符号位不动而只移动数据位的，称算术移位；若符号位和数据位一起移动的，称逻辑移位；若将数据的最高位和最低位连接后一起移动的，称循环移位。

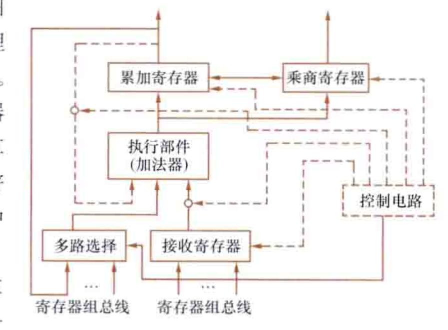
乘、除运算是以加、减和移位操作为基础的。由乘数的一位或几位控制，将被乘数逐次累加并移位，即能实现乘法运算；将被除数和除数逐次相减并移位，根据余数符号确定商的值，即能实现除法运算。

除四则运算外，有的运算器还能执行求平方根，从一批数据中寻求最大数，对一批数据连续执行相同操作等复杂运算。

运算器的逻辑操作是两个数据按位进行的。二值变量之间的逻辑操作有 16 种。常用的为与、或、非和异或等。

运算器结构 运算器的结构与操作种类密切相关。简单的运算器只有加、减操作，乘、除运算由软件实现，其结构虽简单，但速度慢得多。具有加、减、乘、除操作的运算器包括寄存器和执行部件两部分。典型的运算器结构如图所示，有保存操作数和运算结果的累加寄存器和乘、除运算时存放乘数和商数的乘商寄存器。执行部件包括并行加法器和输入/输出控制门电路。多路选择器实现加法器的输入选择。数据信号（图中实线）是加法器的加工对象。

控制信号（图中虚线）是由处理器的控制器提供的。为了减少对存储器的访问，有的运算器设有多个通用寄存器，用于暂存中间结果。



典型的运算器结构

为了提高运算速度，某些大型计算机中采用阵列乘法器、倒数除法器等快速乘除部件，流水线运算部件等。这种运算器结构比传统的复杂得多，但速度高。



Z bianhuanfa

Z 变换法 (Z transform method) 使用 Z 变换分析研究离散系统的数学方法。Z 变换在离散系统中的地位与作用，类似于连续系统中的拉普拉斯变换。

Z 变换 连续信号 $x(t)$ 经采样得采样信号 $x_s(t)=\delta_T(t)x(t)$，即 $x_s(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(t)\ \delta(t-nT)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(nT)\times\delta(t-nT)$，$T$ 为采样周期。对采样信号取拉普拉斯变换，得 $X_s(t)=\mathscr{L}[x_s(t)]=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(nT)e^{-nTs}$。

令 $e^{Ts}=z$，并将 $X_s(s)$ 写成 $X(z)$，得 $x_s(t)$ 的 Z 变换

$$\mathscr{Z}[x(t)]=\mathscr{Z}[x_s(t)]=X(z)$$

$$=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(nT)z^{-n}$$

上式称为双边 Z 变换。因为只考虑采样瞬时的信号值，因而 $x(t)$ 的 Z 变换与 $x_s(t)$ 的 Z 变换相同。

在实际问题中，总存在着一个起始点，可令起始点为 $n=0$。于是，可不研究 $n<0$ 的情况，而有

$$\mathscr{Z}[x(t)]=\mathscr{Z}[x_s(t)]=X(z)=\sum_{n=0}^{\infty}x(nT)z^{-n}$$

上式称为单边 Z 变换，这是大量使用的。

在很多场合，强调的是序列 $x(n)$，$n=0$，1，2，…，就有

$$X(z)=\sum_{n=0}^{\infty}x(n)z^{-n}$$

上面所定义的 Z 变换，只有当级数收敛时才有意义。对于任意给定的有界序列 $x(n)$，使 $X(z)$ 级数收敛的所有 z 值之集合，称为 Z 变换 $X(z)$ 的收敛域。例如

$$x(n)=\begin{cases}a^n, n\geqslant 0\\ 0, n<0\end{cases}$$

$$X(z)=\sum_{n=0}^{\infty}x(n)z^{-n}=\sum_{n=0}^{\infty}(az^{-1})^n$$

$|z|>|a|$ 时级数收敛，$|z|>|a|$ 即为其收敛域。

Z 变换的基本性质 若已知 $X(z)=Z[x(n)]$，$Y(z)=Z[y(n)]$，则有（有相应的收敛域问题）：

（1）线性 $Z[ax(n)+by(n)]=aX(z)+bY(z)$

（2）位移性

$$\mathscr{Z}[x(n+m)]=z^m[X(z)-\sum^{m-1}x(k)z^{-k}]$$

$$\mathscr{Z}[x(n+1)]=zX(z)-zx(0)$$

（3）Z 域微分

$$\mathscr{Z}[nx(n)]=-z\frac{d}{dz}[X(z)]$$

$$\mathscr{Z}[tx(t)]=-Tz\frac{d}{dz}[X(z)]$$

（4）Z 域尺度变换

$$\mathscr{Z}[a^nx(n)]=X\left(\frac{z}{a}\right)$$

（5）初值定理

$$x(0)=\lim_{z\to\infty}X(z)$$

（6）终值定理

$$\lim_{n\to\infty}x(n)=\lim_{z\to 1}[(z-1)X(z)]$$

（7）时域卷积定理 $Z[x(n)*y(n)]=X(z)Y(z)$

Z 反变换 已知 $X(z)$ 及其收敛域，反求序列 $x(n)$。Z 反变换的一般表达式为

$$x(n)=\mathscr{Z}^{-1}[X(z)]=\frac{1}{2\pi j}\oint_c X(z)z^{n-1}dz$$

式中 c 是在 $X(z)$ 的收敛域内的一条包围坐标原点逆时针方向的围线，且 c 包围了 $X(z)$ 的所有奇点。在实际中，通常 $X(z)z^{n-1}$ 是 z 的有理函数，其奇点都是孤立奇点（极点）。这样，根据复变函数的留数定理，可以把上述积分表示为围线 c 内所包含 $X(z)z^{-1}$ 的各极点留数之和，即

$$x(n)=\sum_m \text{Res}[X(z)z^{n-1}]_{z=z_m}$$

求 Z 反变换的方法有长除法、部分分式法和留数法。例如，$X(z)=\frac{10z}{(z-1)(z-2)}$，求 $x(n)$。

（1）方法一：长除法

将 $X(z)$ 的分子除以分母，得

$$X(z)=10z^{-1}+30z^{-2}+70z^{-3}+150z^{-4}+\cdots$$

$$=\sum_{n=0}^{\infty}10(-1+2^n)z^{-n}$$

与 Z 变换定义式相对照，得 $x(n)=10(-1+2^n)$，$n=0$，1，2，…。

（2）方法二：部分分式法

由 $\frac{X(z)}{z}=\frac{10}{(z-1)(z-2)}=\frac{-10}{z-1}+\frac{10}{z-2}$

得 $X(z)=-\frac{10z}{z-1}+\frac{10z}{z-2}$

由 $\mathscr{Z}^{-1}\left[\frac{z}{z-1}\right]=1, \mathscr{Z}^{-1}\left[\frac{z}{z-2}\right]=2^n$

得 $x(n)=10(-1+2^n)$，$n=0$，1，2，…。

（3）方法三：留数法

$$x(n)=\frac{1}{2\pi j}\oint_c\left[\frac{10z}{(z-1)(z-2)}z^{n-1}\right]dz$$

$$=\frac{1}{2\pi j}\oint_c\left[-\frac{10z^n}{z-1}+\frac{10z^n}{z-2}\right]dz$$

$$=\text{Res}\left(-\frac{10z^n}{z-1}\right)_{z=1}+\text{Res}\left(\frac{10z^n}{z-1}\right)_{z=2}$$

$$=10(-1+2^n), n=0,1,2,\cdots$$

三种方法的结果一致。

用 Z 变换求解线性常系数差分方程 先对原差分方程取 Z 变换，然后求未知数为 z 的代数方程的解，最后再作 Z 反变换可得差分方程的解。例如，差分方程为

$$x(n+2)+3x(n+1)+2x(n)=0$$

$$x(0)=0, x(1)=1$$

取 Z 变换，有 $z^2X(z)-z^2x(0)-zx(1)+3zX(z)-3zx(0)+2X(z)=0$。代进初始数据并化简，得 $X(z)=\frac{z}{z^2+3z+2}=\frac{z}{(z+1)(z+2)}=\frac{z}{z+1}-\frac{z}{z+2}$，最后得 $x(n)=(-1)^n-(-2)^n, n=0,1,2,\cdots$。

Z chuandi hanshu

Z 传递函数 （Z transfer function） 零值初始条件下线性定常离散系统输出序列的 Z 变换与输入序列的 Z 变换之比。

单输入单输出线性定常离散系统的差分方程表达式为

$$\sum_{k=0}^{N}a_k y(n-k)=\sum_{r=0}^{M}b_r x(n-r)$$

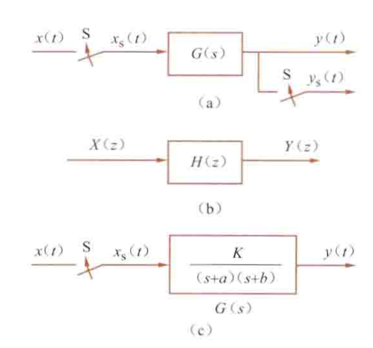
式中 a_k 和 b_r 为差分方程的系数；$x(n)$ 为输入序列；$y(n)$ 为输出序列。系统处于零值初始条件下，取 Z 变换，有

$$Y(z)\sum_{k=0}^{N}a_k z^{-k}=X(z)\sum_{r=0}^{M}b_r z^{-r}$$

从而得
$$H(z)\ \frac{Y(z)}{X(z)}=\frac{\sum_{r=0}^{M}b_r z^{-r}}{\sum_{k=0}^{N}a_k z^{-k}}$$

$H(z)$ 即为线性定常离散系统的 Z 传递函数，图（b）示其输入-输出关系。

图（a）示一开环离散系统（采样数据系统）的框图。连续信号 $x(t)$ 被采样后得采样信号 $x_s(t)$，它作为系统的连续性部分［其传递函数为 $G(s)$］的输入量，输出量则为连续信号 $y(t)$。在输出端另有一个采样器，它在相位上与输入采样器同步，采样周期相同，则输出端有采样信号 $y_s(t)$。若无输出采样器，则假想有一个输出采样器（工作情况同上），于是即可研究 $x_s(t)$ 和 $y_s(t)$、$X(z)$ 和 $Y(z)$ 的关系。



离散系统和 Z 传递函数

（a）采样数据系统框图；（b）Z 传递函数；（c）具有一个采样器的离散系统

离散系统的 Z 传递函数 $H(z)$ 可依下列步骤求得：

（1）求系统的连续部分的传递函数 $G(s)$；

（2）求冲激响应函数 $g(t)$，$g(t)=\mathscr{L}^{-1}[G(s)]$；

（3）求 Z 传递函数，$H(z)=\sum_{n=0}^{\infty}g(nT)z^{-n}$。

例如，线性定常离散系统的框图如图（c）所示，$G(s)=\frac{K}{(s+a)(s+b)}=\frac{K}{b-a}\left(\frac{1}{s+a}-\frac{1}{s+b}\right)$，$g(t)=\frac{K}{b-a}(e^{-at}-e^{-bt})$，$g(nT)=\frac{K}{b-a}(e^{-ant}-e^{-bnt})$，$H(z)=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{K}{b-a}(e^{-ant}-e^{-bnt})z^{-n}$，因为 $\sum_{n=0}^{\infty}e^{-anT}z^{-n}=\frac{1}{1-e^{-aT}z^{-1}}$（这是等比级数），所以

$$H(z)=\frac{K}{b-a}\left(\frac{1}{1-e^{-aT}z^{-1}}-\frac{1}{1-e^{-bT}z^{-1}}\right)$$
$$=\frac{K}{b-a}\times\frac{z(e^{-aT}-e^{-bT})}{(z-e^{-aT})(z-e^{-bT})}$$

将 Z 传递函数的分子与分母多项式作因式分解，得

$$H(z)=G\frac{\prod_{r=1}^{M}(1-z_r z^{-1})}{\prod_{k=1}^{N}(1-p_k z^{-1})}$$

式中 z_r 是 $H(z)$ 的零点，p_k 是 $H(z)$ 的极点，G 是增益，它们由差分方程的系数 a_k 和 b_r 决定。

Z 传递函数在离散系统中的地位和作用，类似于连续系统中的传递函数。离散系统中采样器的数目和位置，对于 Z 传递函数有重要影响。

zailiuzi

载流子 （carrier） 在半导体中载运电流的带电粒子——电子和空穴，又称自由载流子。在一定温度下，半导体处于热平衡状态，半导体中的导电电子浓度 n_0 和空穴浓度 p_0 都保持在一个稳定的数值，这种处于热平衡状态下的导电电子和空穴称为热平衡载流子。

在本征半导体中只发生热激发时，电子数目等于空穴数目，此时热平衡载流子浓度为

$$n_0=p_0=n_i$$
$$=4.82\times10^{15}\left(\frac{m_p^* m_n^*}{m_0^2}\right)^{\frac{3}{4}}T^{\frac{3}{2}}\exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \qquad (1)$$

式中 m_0 为电子质量，kg；m_n^* 为电子有效质量，kg；m_p^* 为空穴有效质量，kg；k 为玻耳兹曼常数，J/K；E_g 为禁带宽度，eV；n_i 为本征载流子浓度，cm^{-3}；T 为绝对温度，K。

对于杂质半导体，N 型半导体中的电子和 P 型半导体中的空穴称为多数载流子（简称多子），而 N 型半导体中的空穴和 P 型半导体中的电子称为少数载流子（简称少子）。在杂质完全电离的情况下，N 型半导体中多子浓度 n_n 及少子浓度 p_n 分别为

$$\left.\begin{aligned}n_n&=N_D\\p_n&=\frac{n_i^2}{N_D}\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

P 型半导体中多子浓度 p_p 及少子浓度 n_p 分别为

$$\left.\begin{aligned}p_p&=N_A\\n_p&=\frac{n_i^2}{N_A}\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

上两式中 N_D 为施主杂质浓度；N_A 为受主杂质浓度。

如果对半导体施加外界作用（如用光的或电的方法），破坏了热平衡条件，使半导体处于与热平衡状态相偏离的状态，则称为非平衡状态。处于非平衡状态的半导体，其载流子比平衡状态时多出来的那一部分载流子称为非平衡载流子。在 N 型半导体中，把非平衡电子称为非平衡多数载流子，非平衡空穴称为非平衡少数载流子。对 P 型半导体则相反。在

半导体器件中，非平衡少数载流子往往起着重要的作用。

zailiuzi shouming

载流子寿命 (life time of carriers) 非平衡载流子在复合前的平均生存时间，是非平衡载流子寿命的简称。在热平衡情况下，电子和空穴的产生率等于复合率，两者的浓度维持平衡。在外界条件（例如光照）作用下，将产生附加的非平衡载流子，即电子-空穴对；外界条件撤销后，由于复合率大于产生率，非平衡载流子将逐渐复合消失掉，最后回复到热平衡态。非平衡载流子浓度随时间的衰减规律一般服从 $\exp(-t/\tau)$ 的关系，常数 τ 表示非平衡载流子在复合前的平均生存时间，称为非平衡载流子寿命。在半导体器件中，由于非平衡少数载流子起主导作用，因此 τ 常称为非平衡少数载流子寿命，简称少子寿命。τ 值范围一般是 10^{-1}～$10^{3}\mu s$。复合过程大致可分为两种：电子在导带和价带之间直接跃迁，引起一对电子-空穴的消失，称为直接复合；电子-空穴对也可能通过禁带中的能级（复合中心）进行复合，称为间接复合。每种半导体的 τ 并不是取固定值，将随化学成分和晶体结构的不同而大幅度变化，因此，寿命是一种结构灵敏参数。τ 值并不总是越大越好。对于 Si 单晶棒和晶体管的静态特性来说，希望 τ 值大些。但是，对于在高频下使用的开关管，却往往需要掺杂（扩散金），以增加金杂质复合中心，降低 τ 值，提高开关速度。近年来，在电力电子器件生产中，常用电子束辐照代替掺金，降低 τ 值。在 Si 和 GaAs 材料、器件和集成电路生产过程中，τ 值是必须经常检测的重要参数。

zaixitong kebiancheng de kebiancheng luoji qijian

在系统可编程的可编程逻辑器件 (in-system programmability programmable logic device，ISP-PLD)

利用在系统编程技术的可编程逻辑器件（PLD）。一般 PLD 采用编程器（又称烧录器）编程，而在系统编程技术可以不用编程器，而是通过计算机接口和编程电缆，直接在用户自己设计的目标系统中或线路板上对 PLD 编程。这种技术有利于提高系统的可靠性，便于系统板的调试和修改电路功能。

在系统编程与普通编程的基本操作并无区别，但编程时，由于 PLD 各端口与实际电路相连，应通过器件中 I/O 端的三态缓冲电路控制，使其处于禁止状态，避免与外电路的相互影响。编程方式有：①利用 PC 机的 I/O 口编程；②利用用户目标板上自备单片机或微处理器编程；③多芯片 ISP 编程。

采用在系统编程技术可以在器件焊接在电路板上以后对系统编程或重构；若要改变设计，不必改动元器件或印制板，通过开发系统软件即可完成；对整个系统可分块调试，最后联调，十分方便；在调试过程中不必反复拔插器件，不致损伤引脚，提高了系统的可靠性，且可进一步缩小体积。

zantai fenliang

暂态分量 (transient component) 周期性激励作用于有损、线性、非时变的动态电路时，从全响应中减去稳态分量的余下部分。记全响应为 $x(t)$，稳态分量为 $x_{ss}(t)$，暂态分量为 $x_{ts}(t)$，则

$$x(t)=x_{ss}(t)+x_{ts}(t)$$

或

$$x_{ts}(t)=x(t)-x_{ss}(t)$$

暂态分量是随时间衰减的，经足够长的时间后，暂态分量消失，即 $t\to\infty$ 时 $x_{ts}(t)\to 0$。

在直流激励或周期性激励作用下，全响应中有稳态分量。暂态分量消失后，全响应等于稳态分量。若激励只在有限时间内存在，例如脉冲激励，或者激励在长时间以后趋于零，例如按指数衰减的激励 $Ue^{-\alpha t}$、$Ue^{-\alpha t}\sin\omega t$，其中 $\alpha>0$，则电路响应的稳态分量是零 $[x_{ss}(t)=0]$。此时，暂态分量就是全响应，即 $x(t)=x_{ts}(t)$。

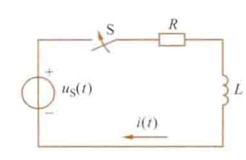


图 1 RL 串联电路

图 1 所示为电阻 R 和电感 L 串联电路。时间 $t=0$ 时开关合上。电源电压 $u_S(t)$ 有三种情况：① $u_S=U$；② $u_S=U\sin\omega t$；③ $u_S=Ue^{-\alpha t}$。式中 U、ω、α 都是正值常数。这三种情况下电流 $i(t)$、暂态分量 $i_{ts}(t)$ 和稳态分量 $i_{ss}(t)$ 的波形如图 2 所示。

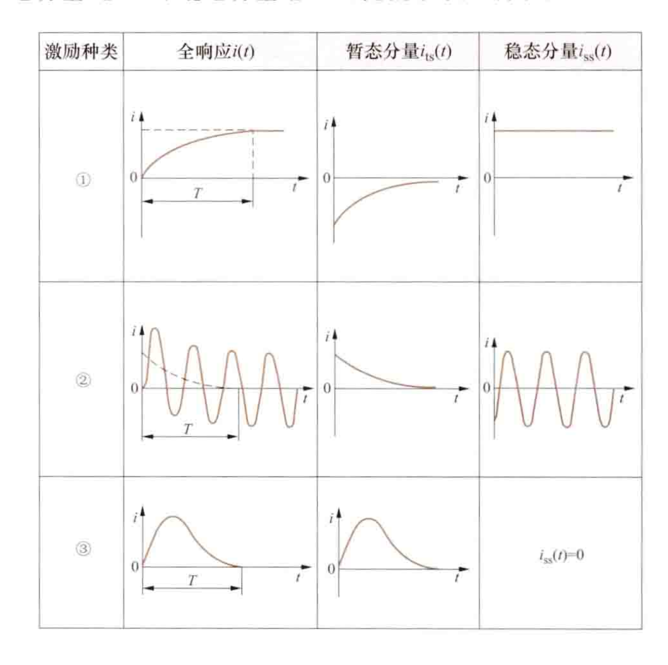


图 2 三种典型激励下 RL 电路中的各种波形

在电工问题中，经常遇到直流和正弦电流电路。当电路的工作状态发生变化时（电源的接入、断开或参数的变化等），电路中的全响应将从原有的稳态变化到新的稳态。这一变化往往要经历一个过程，在这个过程中暂态分量逐渐消逝。这个过程工程上称之为过渡过程或暂态过程、瞬态过程。图 2 中，电流 $i(t)$ 从开关闭合前的“零”值变化到闭合后新的稳态值之间所经历时间 T 的过程也就是过渡过程。

zhenkong dianzi qijian

真空电子器件 (vacuum electronic device) 电子在真空中与电磁场发生相互作用，将一种形式的能量转换成另一种形式能量的电子器件。真空电子器件都有真空密封管壳和若干个电极，管壳内抽成真空，残余气体压强为 10^{-4}～10^{-6} Pa。有些真空电子器件，在抽出管壳内气体后，再

充进所需成分和压强的气体，构成另一种充气电子器件。

由于半导体器件的迅速发展，20世纪60年代以来，低频小功率电子管已被晶体管所取代；但真空电子器件具有频率高、功率容量大的显著优点，故高频大功率领域现仍被真空电子器件占据。真空电子器件与固态器件互相渗透，产生出一些新型电子器件，如电子束半导体器件等。

真空电子器件主要包括静电控制电子管、微波电子管、电子束器件、光电器件、真空指示器、X射线管及等离子体显示器等。①静电控制电子管：借助电子热电发射现象和改变管内电极上的电位，使管内各电极间电场发生变化，从而控制电子运动的真空电子器件。它能实现直流电能和电磁振荡能量之间的转换。按管内电极数目可分为二、三、四、五极管等。有些电子管为复合管，如双二极管，二极—三极管，三极-五极管等。按用途可分为收信管和发射管，主要用于无线电广播、电视广播、无线电通信、雷达、工业加热和粒子加速器等。②微波电子管：工作于微波波段的真空电子器件。微波电子管用来把直流能量转换成频率为300MHz到3000GHz的电磁振荡能量，用于雷达、电视、微波通信、导航、遥控遥测及微波烘烤等领域。③电子束器件：通过形成和控制弱电流电子束实现多种信号转换的真空电子器件。它主要用于电信号与光信号之间的转换。如显示管和显像管用来实现电信号到光学图像的转换，摄像管用来实现光学图像转换为电信号。各类电子束器件广泛应用于电视摄像与显像、电视传真、计算机终端显示、测量仪表、雷达、医学等领域。④光电器件：利用光电子发射现象，把光信号变为电信号的真空电子器件，包括光电管、光电倍增管等，主要应用于自动控制、天文研究、核物理、传真通信、激光探测、空间研究等。⑤真空指示器：用来把电信号变成数字、字符等光信号显示出来的真空电子器件，包括荧光数码管、电光指示器等，主要用于测量仪表、信息显示设备。⑥X射线管：用于产生X射线的真空电子器件。它可将直流电能转换成X射线能量，主要用于医学诊断治疗、零件无损检验、物质结构分析、光谱分析等。⑦等离子体显示器：基于气体放电原理的平板显示器件，主要应用于电视机等信息显示领域。

zhenkong jichuan

真空击穿 (electrical breakdown in vacuum) 在高真空的初始条件下，即电子和离子的平均自由行程远大于电极间隙距离，以致间隙空间的碰撞电离可以忽略时，电极间施加很高的电压而引起的自持放电过程。

高真空间隙是一种强度很高的绝缘间隙，其击穿场强达1.3MV/cm，广泛地用于真空断路器、粒子加速器和电子管等设备中。真空间隙的击穿常常是破坏性的和不可逆转的，会破坏电极，从而使间隙在此后较低电压下就会击穿。研究真空击穿的机理，有助于采取相应的预防措施，以提高真空间隙的绝缘性能。

1897年R. W. 伍德（R. W. Wood）首先对真空击穿进行了研究。在真空间隙上施加高压，一般都能观察到很小的、但数值确定的所谓预放电电流；当电压升高时，电流增加很快，而且有一些所谓微放电的尖峰叠加在电流上；当电压上升到某一值U_b时，电流突然增加到由外回路确定的数值，则发生真空击穿，U_b称为击穿电压，见图1。由于与电极有关的某些过程使局部电极材料气化，局部气压的提高将进一步引发电离和放电过程，最终导致整个间隙的击穿。真空击穿理论有场致发射引发击穿和微粒引发击穿。

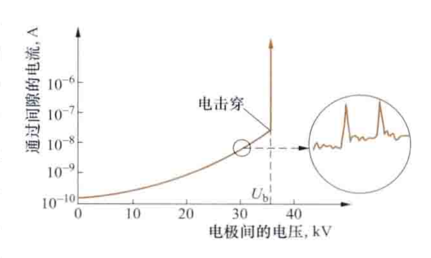


图1 平板真空电极间，电流和电压间的非线性关系
U_b—击穿电压

在短间隙（$d \leqslant 2$mm）中，场致发射过程起主要作用；在大间隙（$d \geqslant 5$mm）中，微粒机制起主要作用；中间的距离是二者的过渡区。

场致发射引发击穿 在10^9 V/m数量级的强电场的作用下，金属表面要发生场致电子发射（见阴极电子发射）。在真空间隙上实际施加的工作场强在5×10^7 V/m以下，用透射电子显微镜观察电极，发现其表面有一些微小凸点，见图2。在凸点尖部电场增强系数达150，从而使局部微观场强超过10^9 V/m，发生显著的场致电子发射。当电压升高时，发射电流密度加大。当阴极上的凸点很尖时，它会发生爆发性的气化，产生微小的等离子体，进而可能引发整个间隙的击穿。当阴极上的凸点不太尖锐时，由它发射的电子束的功率密度很大，在阳极表面产生热点，引起阳极材料的气化，而引发击穿。

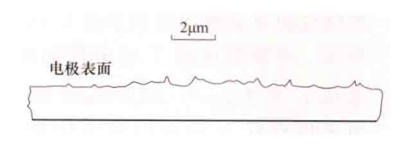


图2 电极表面的显微图

微粒引发击穿 在电极表面存在许多尺寸为微米数量级的粒子，它们不太紧密地附在电极表面上。在强电场的作用下，它们带着电荷离开电极表面，并在间隙中加速，直到碰撞到对面电极。因它们的动能很大，引起对面电极材料的熔化、气化，为产生微小的等离子体创造条件。有两种说明飞行微粒产生微小等离子体的模型：①当带电微粒飞行到与对面电极相距几微米距离时，可产生10^9 V/m的强电场，而发生强的场致发射，使局部电极或微粒气化，产生微小等离子体，从而可能引发整个间隙的击穿。②阳极上的微粒向阴极飞行，在途中被阴极发射电流加热、气化，产生微小等离子体。

真空击穿理论还在不断发展。近年来实验观测和理论模型说明，电极表面的绝缘夹杂物，在电极表面上与电极绝缘的金属和非金属微粒都是很强的场致电子发射点。

zhendong jianliuji

振动检流计 (vibration galvanometer) 见检流计。

zhenzi

振子 (vibrator) 见检流计。

zhengliu dianlu

整流电路 (rectifier circuit) 用具有单向导电特性的器件将交流电转变成脉动直流电的电路。

电力系统控制电路中所用的电源和系统所使用的各种电子设备中的电源，通常都是直流电源，其中有许多是由交流电通过整流、滤波、稳压电路转换得到的。整流电路将交流电转变为脉动直流电。滤波电路将脉动直流电中的脉动成分滤去，使之成为平滑的直流电。整流电路所用的单向导电器件有硒整流器、半导体整流二极管、整流桥堆、高压硅堆和晶闸管等。

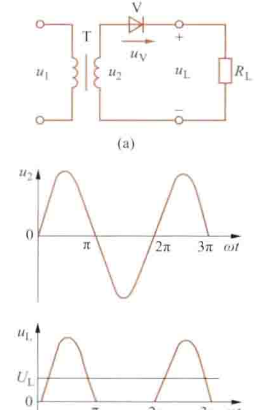


图1 单相半波整流电路及波形图

(a) 单相半波整流电路；(b) 各点电压波形图

按输出电压平均值能否调节，整流电路可分为不可控整流电路和可控整流电路；按单向导电器件在电路中的接法，可分为半波、桥式和全波整流电路；按交流电源的形式，又可分为单相和三相整流电路。小功率整流器常采用单相整流电路；中、大功率整流器则采用三相整流电路。

单相半波整流电路 单相半波纯电阻负载整流电路如图1(a)所示。电源变压器T将单相交流电压u_1变为$u_2=\sqrt{2}U_2\sin\omega t$时，由于整流管V的单向导电作用，输出电压$u_L$不再是正弦波，而是一系列脉动电压，其波形如图1(b)所示。输出电压u_L的平均值U_L(即直流分量)为

$$U_L=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\sqrt{2}U_2\sin\omega t\,d(\omega t)=\frac{\sqrt{2}}{\pi}U_2\approx 0.45U_2$$

输出电流平均值I_L为

$$I_L=\frac{U_L}{R_L}=\frac{\sqrt{2}U_2}{\pi R_L}$$

在此电路中，u_L基波角频率和u_2相同，其输出基波分量的幅值U_{L1m}为$\frac{U_2}{\sqrt{2}}$，此基波分量的幅值和输出电压平均值之比为脉动系数M，即

$$M=\frac{U_{L1m}}{U_L}=\frac{\pi}{2}\approx 1.57$$

流过变压器二次绕组的电流有效值I_2为

$$I_2=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}I_{2m}^2\sin^2\omega t\,d(\omega t)}=\frac{\pi}{2}I_L$$

整流电路的直流输出功率$P_L=I_LU_L$和电源变压器二次容量$P_2=I_2U_2$之比为整流效率η，即

$$\eta=\frac{P_L}{P_2}\times 100\%=\frac{2\sqrt{2}}{\pi^2}\times 100\%\approx 28.7\%$$

在此电路中，整流管所承受的最高反向电压$U_{Rm}=\sqrt{2}U_2$。

单相桥式整流电路 单相桥式纯电阻负载整流电路如图2(a)所示。交流供电电压u_2在正半周时，变压器T二次绕组的1端为正极性，整流二极管V1、V3导通，V2、V4截止。电流由变压器的1端通过V1流经R_L、V3回到变压器的2端。在负半周时，变压器的2端为正极性，整流二极管V2、V4导通，V1、V3截止，电流由2端通过V2流经R_L、V4回到1端。交流电的正、负两个半周流过变压器二次绕组的电流方向相反，变压器不会发生直流磁化现象。负载电阻R_L在一个周期内都有电流流过，始终是一个方向，所以负载电阻上的电压平均值比半波整流电路大1倍。其各点电压波形如图2(b)所示。在此电路中，流过变压器二次绕组电流的有效值为

$$I_2=\frac{U_2}{R_L}$$

输出电压所含最低频率的交流分量为$-\frac{4\sqrt{2}U_2}{3\pi}\cos 2\omega t$。脉动系数$M$为

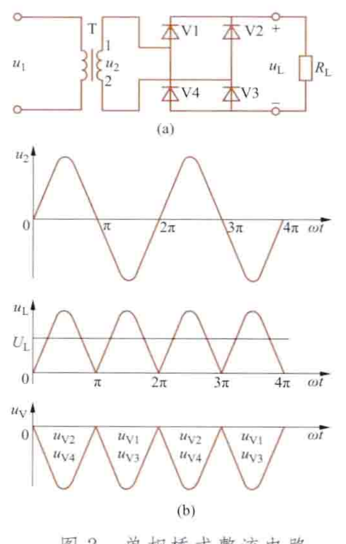


图2 单相桥式整流电路及波形图

(a) 单相桥式整流电路；(b) 各点电压波形图

$$M=\frac{\frac{4\sqrt{2}}{3\pi}U_2}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2}\approx 0.67$$

整流效率η为

$$\eta=\frac{P_L}{P_2}\times 100\%=\frac{8}{\pi^2}\times 100\%\approx 81\%$$

现在普遍采用将四个硅整流二极管封装成一个整体的桥式整流器(简称桥堆)来组成桥式整流电路。桥堆的外形举例如图3(a)所示。桥式整流电路也常画成图3(b)所示形式。

单相全波整流电路 单相全波纯电阻负载整流电路如图4所示。它实际上是两个半波整流电路的组合。图中变压器二次绕组有一中心抽头，$u_{2a}=u_{2b}$。u_{2a}和u_{2b}相对于中心抽头的相位差为180°。在交流电源正、负两个半周时，都有电流i_L流过R_L，因而输出电压中的脉动比半波整流电路小。又由于在交流电压正、负两个半周时，流过变压器二次绕组中电流的流向是相反的，产生的直流磁通互相抵消，因而变压器不会发生直流磁化现象。输出波形和桥式整流电路相同。它和桥式整流电路相比，可少用两只整流管，但每一整流管承受的最大反向电压比桥式整流电路要高1倍，同时变压器二次侧需多一个绕组，因此整流效率要比桥式整流电路低(见表)。

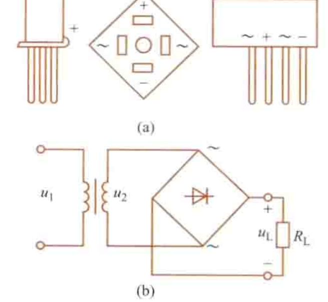


图3 桥堆外形及桥式整流器电路图

(a) 桥堆外形；(b) 桥式整流器电路

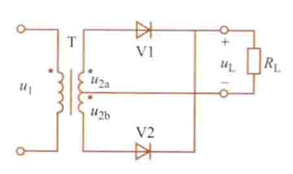


图4 单相全波整流电路

三种单相纯电阻负载整流电路的特性比较表

电路形式	电源变压器二次绕组交流电压有效值	输出电压平均值	每一整流管承受的最大反向电压	通过整流管的电流平均值	整流效率 η(%)	脉动系数 M	纹波的最低频率	需用整流二极管的数目
半波整流	U_2	$0.45U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$0.45\frac{U_2}{R_L}$	28.7	1.57	f	1
桥式整流	U_2	$0.9U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$0.45\frac{U_2}{R_L}$	81	0.67	$2f$	4
全波整流	$U_{2a}+U_{2b}=2U_2$ 要两个绕组	$0.9U_2$	$2\sqrt{2}U_2$	$0.45\frac{U_2}{R_L}$	57.8	0.67	$2f$	2

zhengliushi dianbiao

整流式电表 (rectifier meter) 见变换器式电表。

zhengxianbo xinhao fashengqi

正弦波信号发生器 (sine-wave generator) 能产生频率和幅值都可调节的正弦波形电压信号的电子电路。一般用作信号源，它广泛用于测量仪器和控制系统中。它的电路结构大都包含一个选频网络和一个放大器。调节选频网络的参数即可改变输出电压的频率，调节输出级的参数即可调节输出电压的幅值。

见 RC 正弦波振荡器。

zhengxianbo zhendang dianlu

正弦波振荡电路 (sine-wave oscillator circuit)

能产生正弦波电压信号的电子电路，又称正弦波信号发生器。在调试电力系统中的通信、遥控等电子设备及测量仪器时，经常需要一定幅值和频率的正弦波信号作为信号源，为此，专门生产了正弦波信号发生器。

实际工作中需要不同幅值、频率和功率的正弦波信号，有时要求作标准信号，即要求正弦波电压的幅值和频率高度稳定、准确。因此正弦波振荡电路应具有如下特点：①振荡频率和幅度稳定；②正弦波形失真小，即谐波分量小；③低的输出阻抗，有一定的输出功率。频率范围和输出功率的大小可根据使用需要而选取。

分类　正弦波振荡电路有反馈型振荡电路和负阻型振荡电路两类。反馈型振荡电路根据组成选频网络元件的不同，可以分为 RC 正弦波振荡电路（见 RC 正弦波振荡器）、LC 正弦波振荡电路（见 LC 正弦波振荡器）和石英晶体正弦波振荡电路（见晶体振荡器）。根据频率高低的不同，又可分为低频、高频、甚高频、超高频正弦波振荡电路。

工作原理　针对不同类型的振荡电路，其工作原理有所不同。

(1) 反馈型正弦波振荡电路：原理框图如图 1 (a) 所示，主要由放大电路 $\underline{A}$ 和反馈网络 $\underline{F}$ 两部分电路组成。放大电路 $\underline{A}$ 可以由双极型晶体管、场效应管或集成运算放大器组成；反馈网络可由电阻、电感、电容或石英晶体等组成。一般反馈网络具有选频特性。放大电路的输出信号经过选频网络以正反馈的方式（见反馈放大电路）连接到放大电路的输入端，形成一个闭环系统。

先设想在电路中接有一个开关 S [图 1 (b)]，当 S 断开时，在 $\underline{A}$ 的输入端加入频率为 f 的正弦波电压 $\underline{U}_i$，经放大电路放大后的输出电压为 $\underline{U}_o$，由选频网络反馈回来的电压为 $\underline{U}_f$。如果 $\underline{U}_f$ 和 $\underline{U}_i$ 大小相等、相位相同，那么用 $\underline{U}_f$ 替代 $\underline{U}_i$，输出电压 $\underline{U}_o$ 将保持不变。实际上 S 不存在，电路是接通的，只要满足一定条件，即使输入没有加信号 $\underline{U}_i$ 仍能得到输出电压 $\underline{U}_o$，这种现象称为自激振荡。维持自激振荡的条件是 $\underline{A}\,\underline{F}=1$。这个方程包含幅度平衡条件 $|\underline{A}\,\underline{F}|=1$ 和相位平衡条件 $\varphi_A+\varphi_F=2n\pi$，式中 n 为整数；φ_A 为放大电路的相移；φ_F 为反馈网络的相移。由于输出电压 $\underline{U}_o$ 的幅值保持不变，故又称为等幅振荡。

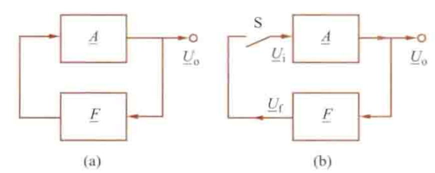


图 1　正弦波振荡电路框图

(a) 工作原理框图；(b) 起振条件分析示意框图

振荡电路有一起振过程。在放大电路中存在噪声或瞬态扰动，它的频谱很宽，其中必然包含振荡频率的成分，经过选频网络选取出振荡频率成分的信号送入放大电路输入端，其他频率成分被抑制。由于噪声和瞬态扰动的信号较弱，在起振时，要求 $|\underline{A}\,\underline{F}|>1$，使放大电路输出信号经多次反馈，幅值由小变大，直至所需幅值。这种随时间幅值由小变大的现象称为增幅振荡。

振荡电路接通电源后进入起振过程，在 $|\underline{A}\,\underline{F}|>1$ 的条件下，放大电路的输出信号将随时间逐渐增大；当幅值增大到一定程度后，利用非线性元件，使 $\underline{A}\,\underline{F}$ 减小，直至满足 $|\underline{A}\,\underline{F}|=1$ 的条件，最终幅值稳定在等幅振荡的幅值上。若 $|\underline{A}\,\underline{F}|<1$，则将产生减幅振荡，直至停振。在正弦波振荡电路中要避免这种情况。幅度平衡条件和输出 $\underline{U}_o$ 幅值的大小，取决于放大电路的非线性特性；相位平衡条件和振荡频率 f_0 的数值，主要取决于选频网络的频率特性。

(2) 负阻型振荡电路：其原理如图 2 所示。G 是负阻器件（见隧道二极管）的增量负电导，G' 是振荡回路的损耗电导。如果 $|G|=G'$，则振荡幅度终将达到稳定值。$|G|>G'$ 称为起振条件，$|G|=G'$ 称为幅度平衡条件。

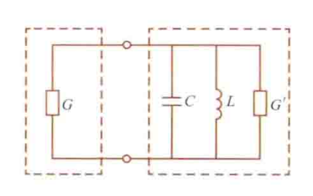


图 2　负阻型振荡电路原理图

zhengxian dianliu

正弦电流 (sinusoidal current) 随时间按正弦规律变化的电流。类似地有正弦电压、正弦磁通量等。电力系统中的电压波形都采用正弦波形。采用正弦波形使发电机、变压器、电动机结构费用减少，并使其具有较高的运转效率。

正弦变量是周期变量中最简单也是最基本的一种。正弦电流的表达式为

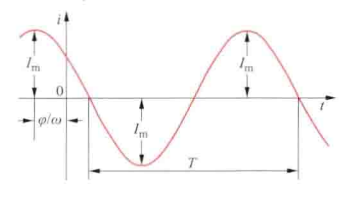
$$i=I_m\cos(\omega t+\varphi)$$

其波形如图所示。式中 I_m 称正弦电流的振幅；$(\omega t+\varphi)$ 称

正弦电流的相位，它反映了正弦的变化进程；φ 是 $t=0$ 时的相位，称初相位；ω 称角频率。正弦量每秒的变化次数称为频率，频率 f 与角频率 ω 和周期 T 有如下关系

$$f=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{1}{T}$$

I_m、ω、φ 也称为正弦量的三要素。



正弦交流波形图

电力工程中常用有效值 I 来衡量周期电流（电压）的大小。这时，正弦电流的表达式为

$$i=\sqrt{2}I\cos(\omega t+\varphi)$$

经常要讨论两个同频率正弦变量之间的相位关系，例如有两个电流

$$i_1=I_{m1}\cos(\omega t+\varphi_1)$$
$$i_2=I_{m2}\cos(\omega t+\varphi_2)$$

$\theta=(\varphi_1-\varphi_2)$ 称为相位差，称 i_1 超前 i_2 θ 角或 i_2 滞后 i_1 θ 角。$\varphi_1=\varphi_2$ 时称 i_1、i_2 同相。

载有正弦电流的电路称正弦电流电路。

zhilu dianliufa

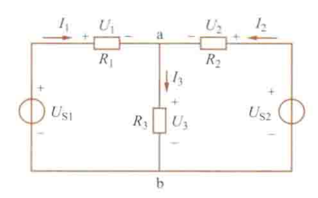
支路电流法

（branch current method）　以电路的支路电流作为待求量求解电路问题的方法。应用支路电流法时，根据欧姆定律，电阻的电压用电阻和电流的乘积表示。

在图示电路中，两个独立电压源的电压 U_{S1}、U_{S2} 和电阻 R_1、R_2、R_3 设为已知量。三个支路电流 I_1、I_2、I_3 是未知量。电阻 R_1、R_2、R_3 的电压分别是 U_1、U_2、U_3，且 $U_1=R_1I_1$、$U_2=R_2I_2$、$U_3=R_3I_3$。对节点 a 可列出基尔霍夫第一定律方程（见基尔霍夫定律）：$I_1+I_2-I_3=0$。沿着含电阻 R_1、R_3 和电压源 U_{S1} 的回路，以及含电阻 R_2、R_3 和电压源 U_{S2} 的回路，可列出基尔霍夫第二定律方程，即

$$R_1I_1+R_3I_3=U_{S1}$$
$$R_2I_2+R_3I_3=U_{S2}$$

以上三个方程是应用支路电流法列出的方程。由这三个方程可解出三个支路电流。



电路图

利用支路电流法计算电路的具体步骤是：设电路图是连通的，即从任一节点出发，可沿着电路图的支路达到任何其他节点。令 b 代表支路数，n 代表节点数。应用支路电流法时，应写出 $(n-1)$ 个独立的基尔霍夫第一定律方程，$(b-n+1)$ 个独立的基尔霍夫第二定律方程，方程总数为 b。由 b 个方程联立解出 b 个支路电流。对于图示电路中，$b=3$，$n=2$，基尔霍夫第一定律方程有 1 个 $(n-1=1)$，第二定律方程有 2 个 $(b-n+1=2)$。

zhishi gongcheng

知识工程

（knowledge engineering）　以知识本身为处理对象，研究知识型系统的学科。1977 年第五届国际人工智能会议上，E. A. 费根鲍姆（E. A. Feigenbaum）首次提出了“知识工程”名称。

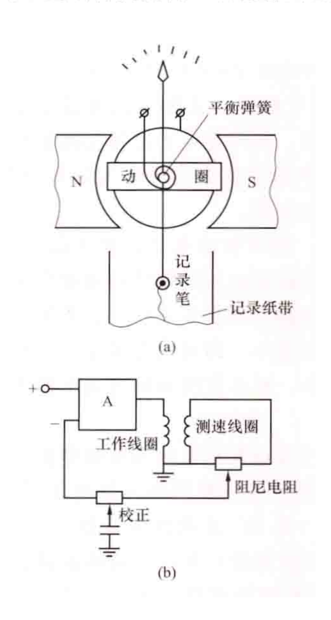
学科内容：①基础理论研究，如知识的分类、结构和效用、知识的表示、知识的获取和机器学习、推理和知识的使用等研究。②实用知识型系统的研究，主要解决在建造该系统过程中遇到的技术问题。③解释与接口模型的研究。④知识工程环境研究，为实际知识型系统的开发提供一些良好的工具和手段。⑤与智能计算机和自动化相关的课题研究。

知识工程研究的目标是构造出高性能的知识型系统，来解决复杂的问题。专家系统是知识工程系统的一种类型。

zhijie qudongshi jilu yibiao

直接驱动式记录仪表

（recording instrument of direct-acting type）　在磁电系测量机构的动圈转轴上装设指针和记录笔，转轴偏转时，驱动记录笔在纸带上直接绘制曲线的记录仪表。它可直接用于记录电网的各种参数，记录其他参数时，一般须配用放大器，以提高灵敏度、工作频率和输入阻抗。这种记录仪表的原理结构如图（a）所示，当动圈中通入电流时，在磁场和平衡弹簧作用下产生一个与该电流成正比的角位移，使指针和记录笔动作。指针示出电流大小，记录笔则在由同步电机驱动的记录纸带上绘出电流随时间变化的曲线，但所绘的线条是圆弧形的。为观察方便，现代的直接驱动式记录仪表在动圈与笔之间都采用圆弧-直线转换机构，以使绘出的线条呈直线形。



直接驱动式记录仪表
（a）原理结构；（b）速度负反馈线路

为获得较高工作频率，要求记录仪表有尽可能高的固有频率和尽可能小的转动惯量，所以平衡弹簧有很大的刚度，且动圈被做得细而长。记录机构具有弹性振荡系统的运动规律，在无足够阻尼时，由于存在谐振，记录机构会发生较大记录失真。依靠在磁场中运动的金属线框产生的阻尼，通过动圈的一部分电流的作用将用于抵消阻尼力矩，因此可改变工作频率。在带有放大器的直接驱动式记录仪表中，采用速度负反馈方法获得必要的阻尼。速度负反馈线路如图（b）所示，在动圈架上绕有工作线圈和测速线圈，阻尼的大小由阻尼电阻调节。校正网络可使工作频率提高约 1.5 倍，但在幅度相同的情况下，频率提高 1 倍，功率增大到 4 倍，所以工作频率不可能由校正网络无限提高。

直接驱动式记录仪表结构简单，成本低，但笔尖与纸的摩擦较大，准确度低。为减小摩擦引起的误差，多使用大驱动转矩型测量机构，如磁电系或铁磁电动系测量机构。另一种间歇型直接驱动式记录仪表可减少笔与纸的摩擦，其记录笔不长期接触记录纸，每隔一定时间才将笔压下一次，记录曲线为断续的点线。

该记录仪表的工作频率小于 100Hz，常用的准确级别为

1.5级（携带式）和2.5级（开关板式），阻尼时间小于2s。

zhiliu

直流 (direct current, DC) 方向和量值不随时间变化的电流。用蓄电池对白炽灯供电时，电路中的电流就是直流。引申之，可指以直流分量为主的电流，例如由整流器输出的电流。直流这两个字也常和其他名词一起构成复合词，例如直流电源、直流输电、直流电路。直流电路实际上是由非时变独立电源（直流电源）供电的非时变电阻电路。在有关现代电路理论的文献里，多用电阻电路一词，直流电路一词少见。

zhiliu danbi dianqiao

直流单比电桥 (Wheatstone bridge) 测量直流电阻的四臂电桥，又称惠斯登电桥。

直流单比电桥包括四个电阻桥臂和两个对角线支路，如图1 (a) 所示，其中R_X为被测电阻；R为比较臂（读数盘）电阻；R_1、R_2为比例臂（比例$K=R_1/R_2$）电阻。电源U、电阻r构成电源对角线支路；指零仪G（一般用检流计）构成指零仪对角线支路。当电桥达到平衡时，指零仪支路两端的电位相等，指零仪中无电流通过，于是有$I_1R_1=I_2R_X$，$I_1R_2=I_2R$。由此得出$R_X=(R_1/R_2)R=KR$，即由三个桥臂的已知电阻可求得被测电阻的量值。

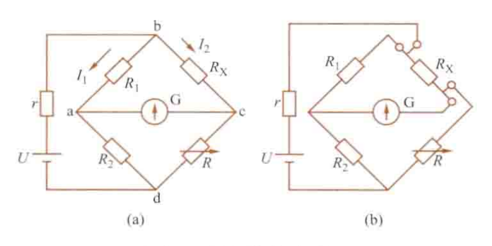


图1 直流单比电桥

(a) 原理接线图；(b) 用单比电桥测低阻值四端电阻

直流单比电桥的特点是：①平衡只与四个桥臂电阻值有关，而与电源电压U、该支路电阻r和指零仪内阻的大小均无关；②平衡时，电源和指零仪的位置可互换而不影响测量结果；③平衡时，一个对角线的状态（开路、短路或接入电阻）不影响另一对角线的状态（电流大小）；④平衡时，通过桥臂电阻的电流变化不影响测量结果；⑤平衡式$R_X=(R_1/R_2)R$中，四个电阻严格来讲是指电桥相邻顶点之间的全部电阻，包括桥臂元件电阻、内部引线电阻、连接导线电阻及开关接触电阻。因此，只用桥臂元件电阻计算平衡式时会引入误差。

直流单比电桥主要用于测量$1\sim10^6\,\Omega$中阻值的二端电阻，且一般应大于10Ω，这是因为被测电阻值较小时，连线电阻和接触电阻的影响相对增大，将造成较大测量误差。单比电桥也可用于测量低阻值的四端电阻，其原理线路见图1 (b)。它是图1 (a) 线路的变形，即改变了R_X支路电桥顶点的位置，使电桥顶点与被测电阻的节点重合，从而将连线电阻分别引入与R_X相邻的桥臂以及电源、指零仪支路中。将相邻桥臂元件的电阻适当选大些，可减小由连线电阻引入的误差。



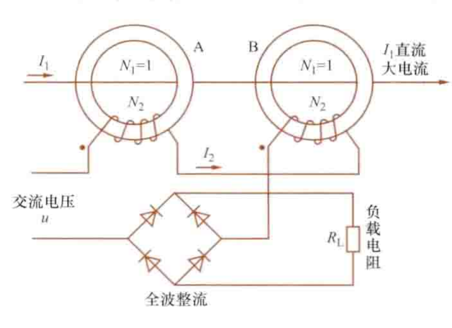
图2 直流单比电桥外形图

图2所示为直流单比电桥的外形图。

zhiliu dianliu huganqi

直流电流互感器 (DC current transformer) 利用闭合铁芯上两绕组间的电磁感应作用和整流电路，将直流大电流变换为直流小电流的仪器。

直流电流互感器的具体线路见图。图中A和B是铁芯。通有直流大电流I_1的导线穿过两铁芯，形成一次绕组，匝数为$N_1=1$。两铁芯上二次绕组的匝数均为N_2。两二次绕组按相反极性串接，由交流电压u供电。



直流电流互感器原理图

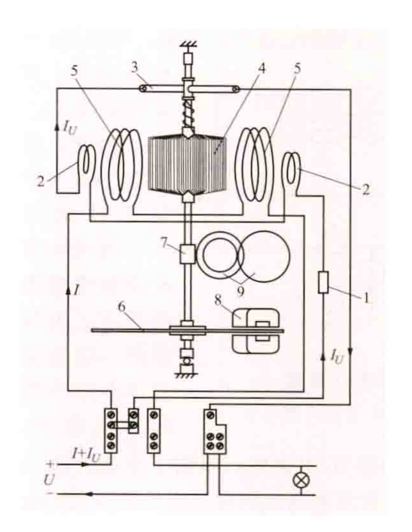
随着交流电流极性的变化，两铁芯轮流处于深饱和与非饱和状态。二次电流受控于非饱和铁芯。理想情况下，对于非饱和铁芯有$N_1I_1=N_2I_2$，或$I_1/I_2=N_2/N_1$，即一次、二次电流与匝数成反比关系。铁芯A和B分别控制I_2的两不同半周。经全波整流后，通过负载R_L的电流已成为直流，可用直流电流表测量。

直流电流互感器主要用于测量直流大电流。采用附加补偿绕组，可提高准确度，获得0.1级的直流电流互感器。如利用电子器件实现铁芯磁通中偶次谐波的反馈，即可形成自动补偿式零磁通直流电流互感器，其相对误差的绝对值可小于0.01%。

与分流器比较，直流电流互感器的一次、二次回路间具有良好的隔离作用，且其本身的能耗也较小。

zhiliu diannengbiao

直流电能表 (DC kWhmeter) 测量直流电路中电能量的电表。



直流电能表机构示意图

1—附加电阻；2—补偿线圈；3—换向器；4—动圈；5—静圈；6—铝圆盘；7—蜗杆；8—制动磁铁；9—齿轮系

电动系直流电能表的原理机构如图所示。线路电压U接到由附加电阻1、补偿线圈2、换向器3及动圈4所组成的回路上。负载电流I通过静圈5产生与之成正比的磁通Φ_I。Φ_I与动圈中电流I_U相作用，产生转矩$M=KI_U\Phi_I=KUI=KP$，即转矩与功率P成正比。动圈和换向器接触环由作120°分布的三组构成，动圈能连续转动。在动圈的轴上固定铝圆盘6和蜗杆7，铝圆盘在制

动磁铁 8 的间隙中转动，产生反作用力矩，因此能在一定转速下达到动平衡。铝圆盘的转动经蜗杆及齿轮系传递至字轮，从而指示出电能数值。

直流电能表的准确级别一般为 2 级，也有 1.5 级和 1 级。它的负载特性受转动部分上、下支承及换向器处产生的摩擦力、空气阻力及补偿力矩等影响。在 75%额定负载以下时，摩擦力矩由补偿力矩补偿后，误差向正方向变化；在 75%额定负载以上时，因空气阻力与转速的平方成正比，误差向负方向变化。

直流电能表的温度特性主要受制动磁铁的温度系数和铝圆盘的电阻温度系数所引起的误差影响。采用热磁合金补偿磁铁的温度系数后，温度改变±10℃时，误差改变可被控制在±0.5%以内。

zhiliu dianweichaji

直流电位差计 (DC potentiometer) 根据补偿原理制成的测量直流电压的仪器，又称直流补偿器。工作时，通过调节可变标准电压使电位差计平衡，即可求得被测电压。平衡状态下电位差计不从被测对象中取电流，故被测对象的工作状况不受影响，且测量回路连线电阻等也不会给测量结果带来误差。直流电位差计电路分为定流变阻式和定阻变流式两种。可变标准电压由固定标准电流流过可调电阻获得的，称为定流变阻式电位差计；由可调电流流过固定标准电阻获得的，称为定阻变流式电位差计。也可将这两种方式结合获得可变标准电压。

定流变阻式电位差计　由标准电流回路、电源回路和测量回路三部分组成，见图 1（a）。①电源回路，包括电源 E_b，可调电阻 r 以及 R_N 和 R，用于调节电位差计的工作电流；②标准电流回路，包括标准电阻 R_N、标准电池 E 和指零仪（一般用检流计），用于校准电位差计的工作电流；③测量回路，由 R_X、检流计及被测直流电压组成。测量时，首先调定工作电流 I，即将开关 S 拨在位置 1，调节电阻 r 使指零仪指零，此时工作电流在 R_N 上产生的电压与标准电池电动势 E 平衡，于是有 $IR_N=E$；然后将开关 S 改拨至位置 2，调节电阻 R_X，即调节电阻 R 的滑动触点位置，使指零仪再次指零，此时 IR_X 与被测电压 U_X 平衡。可知 $U_X=KE$，其中，K 是电阻比 R_X/R_N。因此，电位差计的工作是通过调节 R_X、改变比值 K 来获得被测电压 U_X 的数值的。当电位差计本身不带标准电池时，其准确度只取决于电阻比值 K 的误差，限制了定流变阻式电位差计准确度的提高。按照磁调制原理工作的新型直流电流比较仪式电位差计可将误差降低到 $\pm10^{-6}$ 以下。

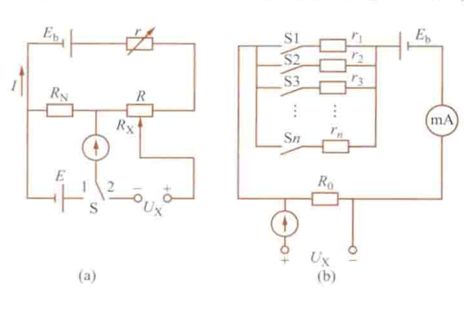


图 1　直流电位差计线路

(a) 定流变阻式；(b) 定阻变流式

测量过程中必须保持工作电流稳定，一般要求其稳定度为电位差计允许误差的 1/10。

定阻变流式电位差计　原理线路见图 1（b）。其工作原理是让不同数值的标准电流流经固定标准电阻 R_0，以获得不同的标准电压值。标准电流来自电源 E_b 分别与不同数值的标准大阻值电阻 r_1、r_2、…、r_n 串联的电路。利用开关 S1、S2、…、Sn 的组合，可改变通过 R_0 的电流值，即可改变 R_0 上的标准电压值，用以平衡未知电压 U_X，此时标准电压值即为 U_X 之数值。

图 2 为电位差计的外形图。

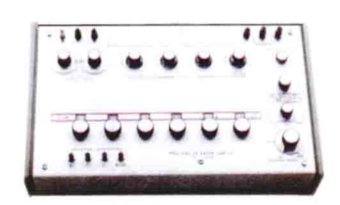


图 2　电位差计

使用时，要合理选用不同原理线路的电位差计。例如，测量低电压时，回路等值电阻较低，热电势影响较大，应采用输入电阻小、热电势小的低电动势电位差计；反之，测量较高的电压时，回路等值电阻高，热电势影响相对较小，应采用输入电阻大的高电动势电位差计。还需合理选用指零仪，以获得最佳的测量灵敏度和阻尼状态。

zhiliu dianya huganqi

直流电压互感器 (DC voltage transformer) 安装在直流极母线和阀厅内中性母线处，用于测量换流站内控制保护系统直流电压的仪器，又称直流电压分压器。按实现原理的不同，分为直流电流互感器式和阻容分压器式两种。

基于直流电流互感器构成的直流电压互感器　原理电路如图 1 所示。该电路中的直流电流互感器部分由 2 个铁芯线圈构成，其中铁芯 A、B 均由高磁导率铁磁材料制成，尺寸一样。两铁芯线圈的 2 个匝数同为 W_1 的一次绕组做同向串联，而 2 个匝数同为 W_2 的二次绕组做反向串联，并经过桥式整流单元接至辅助正弦交流电源 u_S。整流单元的另一对端子之间所接的 R_2 为取样电阻。铁芯线圈一次回路中串有一高压电阻 R_1，其高电位端对地的直流电压为 U_d，R_1 两端的电压为 U_1。在流经二次绕组、电源 u_S 的电流 i_2 的半个周期内，铁芯 A 中磁通的交流分量与一次侧直流电流 I_1 所产生的磁通方向相反，而在铁芯 B 内，这两部分磁通方向却相同；在电流 i_2 相邻的半个周波内，铁芯 A 中的两磁通变为同方向，而铁芯 B 中的两磁通则互为反向。即当两个铁芯同时被直、交流电流所激励时，其中直流电流的大小会引起铁芯饱和程度改变，使通有交流电流的二次绕组的电抗发生变化，从而使 i_2 及二次回路中取样电阻 R_2 两端的电压 U_2 相应改变。

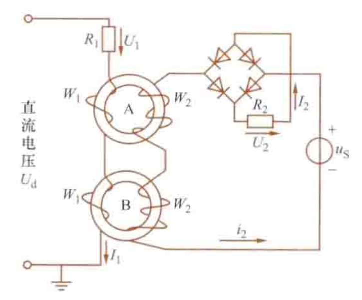


图 1　基于直流电流互感器构成的直流电压互感器原理电路

通常可忽略一次绕组的电阻，并根据图 1 所示，有

$$U_1=I_1R_1;\ U_2=I_2R_2$$

忽略磁化电流条件，有关系

$$I_1/I_2=W_2/W_1$$

于是可得

$$U_2 = W_1R_2U_1/(W_2R_1) = kU_1$$

即直流电压互感器原理电路中的二次电压与一次电压成正比。

阻容分压器式直流电压互感器　原理电路见图 2。电阻支路由高压电阻器R_1和低压电阻器R_2构成，通过的直流电流应为 2mA。电阻器R_1的阻值很大，承受着高电压，一般制成充油或充气结构。电阻器R_2的阻值为 50kΩ，其大小与电压等级无关，输出的直流电压约为 100V。高压电容器C_1和低压电容器C_2是为适应R_1和R_2的瞬时反应而加装的。为补偿电缆电容和低通滤波器电容，C_2的电容值需要在现场或接线箱中调整确定。直流电压互感器低压部分的输出电压由电子设备测量，并根据分压比换算为一次侧电压的大小。

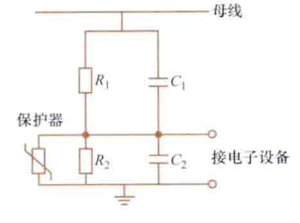


图 2　阻容分压器式直流电压互感器电气接线图

这种直流电压互感器与相应的电子设备组成直流电压测量系统。电子设备由低通滤波器、高稳定分压器和带有缓冲放大器的 A/D 转换器等组成，并采用双回路架构，旨在确保直流电压测量的可靠性。

这种直流电压互感器的时间响应很快，但若无快速响应需求，也可采用最简单的两电阻串联式分压器替代。

zhiliu fangda dianlu

直流放大电路

(DC amplifier)　放大直流和慢变化输入信号的放大电路。直流放大电路常用于测量仪表。在物理电测量和生物电测量中，电信号往往很弱，而且变化缓慢，含有直流成分，经放大后才便于检测、记录和处理。

特点　直流放大电路的特点是直接耦合和零点漂移。①直接耦合。直流放大器要放大的是直流或慢变化的信号，所以各级间必须采用直接耦合，故又称直接耦合放大器。②零点漂移。作为放大器，当输入信号为零时，输出端应当无变化（保持零电平或某一固定电平）。而在直流放大器中，当输入信号为零时，可用仪器观察到输出端的电平偏离零电平或某一已知电平而缓慢地移动。人们把这种现象称为零点漂移（简称零漂）。引起零点漂移的原因很多，如晶体管参数随温度变化、电源电压波动等。随温度变化引起的漂移，往往称为温漂，单位为 μV/℃。在规定的一定时间（如 8h）内产生的漂移，称为时漂，单位为 μV/8h。温漂、时漂都称为零点漂移。

在直流放大电路中，由于采用直接耦合，前级的零点漂移能够传输到后一级去，并逐级进行放大。为了获得较强的输出信号，希望有较大的电压增益。可是增益越大，输出的漂移也越大。若输入信号很弱，有时会造成输入信号被漂移电压淹没，使放大器不能正常工作。可见，增益与零点漂移是直流放大电路设计中需要解决的主要矛盾。

分类　直流放大电路的类型很多，主要有：①直接耦合的单管放大电路。最简单的直流放大电路，该放大电路的缺点是零点漂移大。②利用对管（双极型晶体管或场效应管）构成的*差动放大电路*。一种零点漂移较小的直流放大电路。③*集成运算放大器电路*。应用很广泛的性能较好的多级直流放大电路。④斩波式直流放大电路。在测量仪器中常用的直流放大电路。以场效应管为主构成的斩波器已集成化，例如中国产品 C7650，其失调电压U_{os}可小于 5μV，温漂 dU_{os}/dT 小于 0.05μV/℃。

zhiliu gaodianya celiang

直流高电压测量

(measurment of high direct voltage)

见*高电压测量*。

zhiliu gaodianya fashengqi

直流高电压发生器

(high voltage direct current generator)　产生直流高电压的电源装置。电力设备常需要在直流高电压下进行各类绝缘试验，如绝缘的*泄漏电流测量*和耐压试验。特别是大电机、电力电容器、电力电缆等电容量较大的交流电力设备，在进行交流耐压试验时，由于对试验电源容量要求过大，故常用直流耐压试验来代替交流耐压试验。对于超、特高压直流输电所用的电力设备则更有必要施加直流高电压进行试验。此外，在医学、电子显微镜和原子核物理的加速器等领域都需要直流高压电源设备。

各类直流高压试验所要求的输出电流一般都不会太大，通常为数毫安至数十毫安。个别情况下，例如绝缘子湿闪试验，电流可达 100mA，而污闪试验则可达 1A 甚至更高。

简单的直流高电压发生器　由高压试验变压器 T、高压硅整流器 V 和滤波电容器 C 所组成，如图 1 所示。这是一个半波整流电路，原理与低压单相半波整流电路基本相同。高压电路中需接入保护电阻 R，用来在电源合闸及试品击穿时限制电流以保护硅整流器。

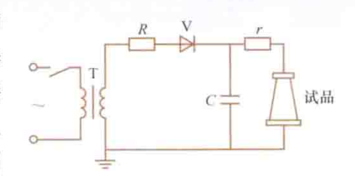


图 1　高电压半波整流电路

图 2 为单相半波整流电路经电容滤波后的输出电压波形。由于负荷电流的影响，输出电压值有一定的脉振。电压脉振为 $\delta U = (U_{max} - U_{min})/2$，输出的额定直流电压的平均值为 $U_d \approx (U_{max} + U_{min})/2$，电压纹波系数为 $s = \delta U/U_d$。中国国家标准规定 $s \leqslant 3\%$。

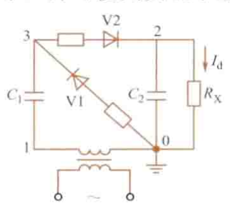
若令直流电流的平均值为 I_d，则 $s \approx I_d/(2fCU_d)$，其中 f 为交流电压的频率。

图 2　半波整流装置的输出波形

直流高电压倍压电路及串级电路　在需要电压更高时，直流高压电源所采用的两种倍压电路如图 3 及图 4 所示。它们的倍压原理见*倍压整流电路*。当电源合闸后，C_1最终可充电到变压器二次电压的峰值U_m。当充电稳定后而且负载平均电流 I_d极小时，C_2上的电压值可近似达到$2U_m$。点 3 的电位在 $0 \sim 2U_m$的范围内变动，故点 3 与点 2 之间的电位差也在 $0 \sim 2U_m$之间变动，V1 与 V2 所承受的最大电压各为 $2U_m$。当考虑有较大负载电流后，输出的直流电压会明显低于空载下的 $2U_m$，差值称为电压降 ΔU，另外也存在脉振 δU。图 3 电路的纹波系数：$s \approx I_d/(2fCU_d) = 1/(2fCR_X)$。式中 C 为图 3 中的C_1及C_2电容量之和，R_X为负载电阻。

多级串级电路的工作原理与图 3 所示的一级倍压电路基

本上相同，图 4 为两级倍压整流电路。压降 ΔU 和脉振 δU 随级数的上升而明显增长，因此串级数不能太多。提高整流源的频率，如提高频率至数千赫或数十千赫，可使串级直流高电压发生器的压降 ΔU 和脉振 δU 减小，并可使其实现小型化。



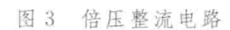


图 3　倍压整流电路

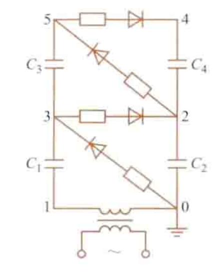


图 4　两级倍压整流电路

图 5 为±1000kV 直流高电压发生器。

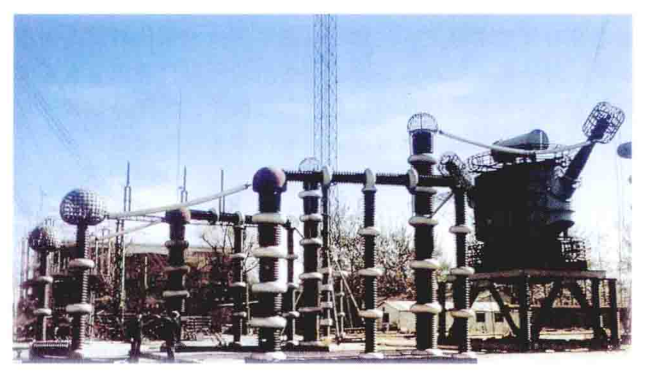


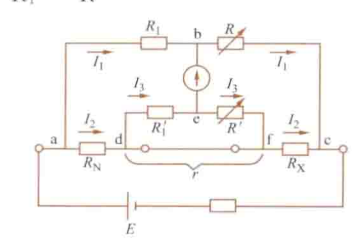
图 5　户外式±1000kV 直流高电压发生器

zhiliu shuangbi dianqiao

直流双比电桥　(Kelvin bridge; Thomson bridge)

测量低值直流电阻的六臂电桥，又称开尔文电桥或汤姆逊电桥。

这种电桥的原理线路如图所示。它由六个桥臂电阻（被测电阻 R_X、标准电阻 R_N、外比例臂电阻R_1和 R、内比例臂电阻 R_1'和 R'）、指零仪（一般用检流计）和电压源支路组成。a、b、c、d、e、f 为电桥顶点。当电桥平衡时，指零仪支路的两顶点 b 与 e 的电位相等，指零仪中无电流通过，于是可得到 $R_X=\frac{R}{R_1}R_N+\frac{rR}{R_1'+R'+r}\left(\frac{R_1'}{R_1}-\frac{R'}{R}\right)$。当满足 $\frac{R_1'}{R_1}=\frac{R'}{R}$ 时，$R_X=R_NR/R_1$。此条件下该电桥具有与直流单比电桥相同的平衡方程式。



直流双比电桥原理接线图

从原理接线可知，被测电阻 R_X 的电位端接线电阻被计入桥臂 R 和 R'中，d 与 f 间的电流端电阻和跨线电阻 r 按 R/R_1 这一比例分配到 R_X 和 R_N 中。计算式中的 R_X 即是被测四端钮式电阻的阻值，因此直流双比电桥可准确测量低值电阻。

为了满足 $\frac{R_1'}{R_1}=\frac{R'}{R}$ 的条件，在制造直流双比电桥时，要求内、外桥臂电阻的名义值相同，即 $R_1=R_1'$、$R=R'$。

直流双比电桥一般用于测量 10Ω 以下的低值电阻。由计算式可知，附加项$\left(\text{即上述公式中的}\frac{R_1'}{R_1}-\frac{R'}{R}\right)$会引入误差。由于不可能使$R_1$与 R_1'和 R 与 R'完全相等，因此使用时，要求连接R_X与R_N的跨线电阻 r 应尽可能小。

zhiwu jueyuanyou

植物绝缘油　(vegetable insulating oil)

从天然油料植物种子中提炼精制的绝缘油。来源广泛、可再生、环保，是最早用于电气工业的液体绝缘材料。用作浸渍剂的植物油主要有蓖麻油、菜籽油、亚麻籽油、棉籽油和棕榈油，其主要成分是油酸、亚油酸、芥酸、棕榈酸等不饱和脂肪酸。

植物绝缘油具有良好的电气性能，室温、工频下的电容率高于矿物绝缘油，90℃时体积电阻率约为 $10^{10}\sim10^{12}\,\Omega\cdot\mathrm{m}$，纯净植物绝缘油的击穿场强高于 $20\mathrm{kV}\cdot\mathrm{mm}^{-1}$。植物油的闪点、燃点均高于 300℃，能满足高燃点环境友好型绝缘材料的要求。植物绝缘油无毒，生物降解率高于 97%。矿物油燃点低、不可再生。合成油生产成本偏高或有毒且生物降解率低，有可能对人和环境造成危害。

植物绝缘油的缺点是凝点偏高（约为−25～−15℃），易氧化，低温黏度大等。可添加降凝剂降低凝点，添加氧化抑制剂提高氧化安定性。同时，通过选择添加剂和优化精炼工艺的方法改善植物油的黏度、水含量和酸值等性能。

植物油在电力设备中早期主要是用于电容器，后逐渐应用到变压器、电缆等中。

zhidu cunchuqi

只读存储器　(read only memory, ROM)

见半导体存储器。

zhiling geshi

指令格式　(instruction format)

见指令系统。

zhiling xitong

指令系统　(instruction sets)

一台计算机所能识别并执行的全部指令的集合。一条指令是由一组二进制代码定义的、中央处理器（CPU）直接执行的一个命令字，是机器级语言的基本语句，也是可执行程序的一个基本操作步。指令系统是计算机系统性能的重要表征，也是计算机系统结构的重要组成部分。

指令格式　指令代码包括操作码段和地址码段两部分。操作码段规定需执行的操作类型；地址码段规定操作数的地址。常见的指令格式有（见图 1）：①三地址指令。地址段中 A1、A2 分别为两个操作数的地址，A3 为结果数的地址。②二地址指令。地址段中 A1 为第一操作数地址，A2 既是第二操作数地址，又是结果数的地址。③单地址指令。地址段 A 为第一操作数地址，第二操作数和结果数的地址隐含规定为处理器中某个寄存器。④零地址指令。CPU 为堆栈型结构的计

操作码段	地址码段			指令
OP	A1	A2	A3	三地址
OP	A1	A2		二地址
OP	A			单地址
OP				零地址

图 1　指令格式

算机中，操作数隐含规定在堆栈顶的两个单元中，操作时依次从堆栈顶弹出两个操作数，运算结果压回堆栈，因此指令代码中不需要地址段。上述各种指令格式中没有包括后继指令地址。为了压缩指令字长度（指令代码位数），后继指令地址用一个程序计数器（又称指令计数器）给出。

寻址方式　根据指令地址段代码确定操作数地址或后继指令地址的过程称寻址。完善的寻址方式能有效地利用指令字的代码，以最少的代码获得最大的存储器寻址空间，而且灵活的寻址方式也为程序设计者有效地组织和使用数据提供了支持。常见的寻址方式有：①立即寻址。见图 2（a），指令地址段给出的是操作数。②直接寻址。见图 2（b），地址段给出的是操作数的地址。③间接寻址。见图 2（c），地址段给出的是操作数地址的地址。④相对寻址。见图 2（d），地址段给出的是位移量 D，操作数有效地址为 D 与程序计数器内容 a（即当前指令地址）之和（即 a＋D）；⑤变址寻址：见图 2（e），地址段给出变址寄存器号 i 和位移量（或称形式地址）D，i 寄存器中的内容 E 和位移量 D 之和（E＋D）为操作数有效地址。

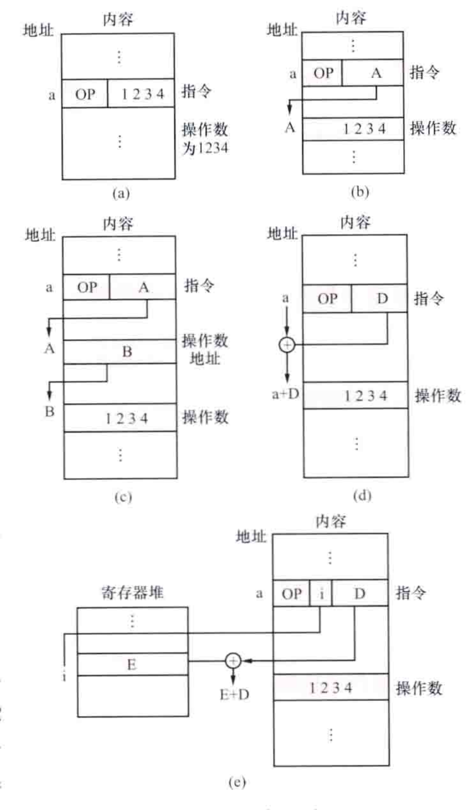


图 2　寻址方式示意图

（a）立即寻址；（b）直接寻址；（c）间接寻址；（d）相对寻址；（e）变址寻址

此外，在上述几种基本寻址方式基础上，可以组合成其他寻址方式。

精简指令系统　经过精心简化，仅保留最常用指令，并且保持指令完备性的指令系统。在精简指令系统中，绝大部分（甚至全部）指令具有相同的编码长度和执行时间（通常在一个时钟周期内执行完），以硬布线逻辑实现指令编码的翻译，并且可充分发挥流水线的优势和编译优化技术，有利于提高运算速度。

使用精简指令系统的计算机称为精简指令系统计算机（reduced instruction set computer，RISC）。这是与复杂指令系统计算机（complex instruction set computer，CISC）相对而言的。对复杂指令系统计算机进行测试表明，各种指令的使用频度相差悬殊，最常用的是一些比较简单的指令，仅占指令总数的 20%，它们在程序中出现的频率占 80%。由于 CISC 的指令系统庞大，且指令格式不一致，会导致微程序译码器结构复杂，也不便于采用流水线等加速指令执行的技术措施。针对 CISC 的这些缺点，IBM 公司的 J. 科克（J. Cocke）于 1974 年发明了 RISC，RISC 结构是计算机体系结构的一次重大变革。

zhineng dianbiao

智能电表

智能电表　（smart meter）　基于微处理器、通信网络和相应软件构建的，用于计量电能及其他生活需量的智能化仪表。智能电表的英文名词 smart meter 出现于 20 世纪 90 年代，最初是描述具有通信能力电子式仪表的通用性术语，翻译为智能仪表或智能表计，逐渐演变为主要指智能电表，是高级量测体系中的主要设备之一。

原理结构　如图 1 所示，以分流器完成电流采样，用分压电阻网络完成电压采样。计量芯片对电压、电流采样信号加以计算和处理，为计量微处理器单元（micro controller unit，MCU）提供准确的电压、电流、功率、电能及谐波等数据信息。计量 MCU 经串行总线从时钟芯片获取实时时间、日期等数据。计量 MCU 除完成各类数据信息的采集和管理外，还实现多种数据如多费率、多阶梯、月冻结、日冻结、负荷曲线等的处理功能，并能控制继电器的拉、合闸操作。通信 MCU 完成对计量 MCU 数据的请求和配置，并将智能电表数据信息经电力线载波、通用无线分组业务（general packet radio service，GPRS）、宽带无线及短距离无线等通信方式传送给主控计算机，通过 RS-485 或短距离无线通信电路传送给 LCD 显示终端，或经 RS-485 或红外通信电路传送给智能手持终端。

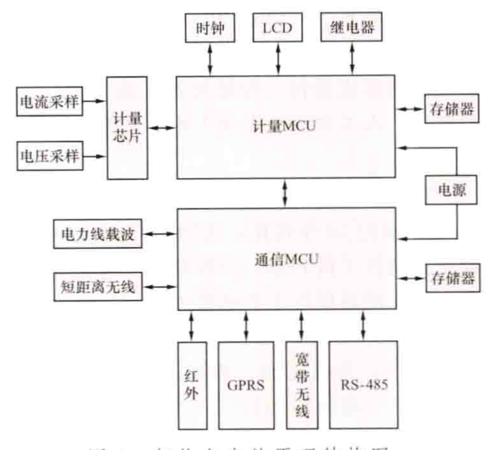


图 1　智能电表的原理结构图

功能　在高级量测体系下，公共事业公司利用智能电表可实现的功能有：①对双向有功电能、无功电能、视在电能、功率因数、有功功率、电压、电流、高次谐波含量、变压器损耗等用电信息的自动采集和计测量；②将新的费率、电价、用户最大需量要求及需量周期下载入表计；③对用户用电实施分时计价、阶梯计价；④对用户负荷实施控制；⑤校对表计内部时钟；⑥自动记录失压、失流、断相、掉电、电压逆向序、表计清零、拉合闸、开表盖、编程等事件；⑦按约定时间间隔记录电压、电流、频率、有功和无功功率、功率因数、有功和无功电能、当前需量等测得数据；⑧为用户提供本地或远程购电信息；⑨以多种措施保障测控数据信息安全可靠；⑩针对不同异常情况，向用户发出提示或报警信号；⑪接受远程指令，发送约定数据或信息等。

针对用户的多样性，智能电表种类、规格、功能呈多样性。在电能计量方面，既有适用于电网关口和大企业的具备

双向通信功能且准确级较高的高端智能电表，也有适于智能楼宇、智能家居的网络化多功能智能电表，还有仅计量电能及可通信的普通智能电能表。图 2 所示为三相智能电能表。



图 2　DTZ395 三相智能电能表系列

用户利用智能电表可实现的主要功能有：①收到紧急状态提示信号；②按准确级对有功、无功、视在电能进行计量；③对以电能形式接入的可再生能源或其他生活需量实施双向计量；④按分时电价、阶梯电价及最大需量计量电能；⑤利用交互显示终端或用户信息系统支付电费、预购电能，或支付耗用其他生活需量的费用、预购其他生活需量等。

zhineng jiqiren

智能机器人　(intelligent robot)　具有人类特有的某种智能行为的机器。可以理解为一类具有高度自主性的自动化机器或设备。智能机器人是力学、机械学、电子学、控制论、人工智能和系统工程等多种学科领域互相交叉的边缘学科。

智能机器人是机器人技术发展的高级形态。

20 世纪 50 年代初，美国的 G. C. 迪伏尔（G. C. Devol）设计并制作了世界第一台机器人实验装置，发表了《适用于重复作业的通用性工业机器人》。60 年代，美国万向自动公司研制的 Unimate 机器人，被公认为一种现代科学技术的典型产物。60 年代后期，机器人的智能行为一般可以演示积木的分类、堆放等动作。70 年代以来，智能机器产业蓬勃兴起，机器人技术发展为专门学科，研究重点转向工业应用。智能机器人的研究范围扩展到对环境的识别，对景物的理解，任务规划以及人机之间的自然语言对话等课题。

一般按照机器人从低级到高级的发展程度，把机器人分为三代。

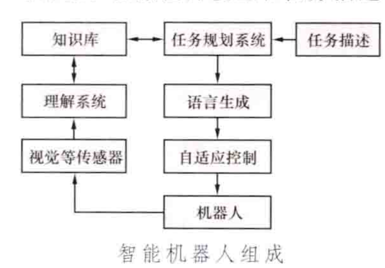
第一代机器人，即工业机器人，主要指只能以“示教-再现”方式工作的机器人。这类机器人的本体是一只类似于人的上肢功能的机械手臂，末端是手爪等操动机构。由于它仅仅通过操作人员“手把手”的示教或者通过离线编程预先存储的动作顺序信息来自动完成重复性的作业，因而通常认为不具备智能。

第二代机器人，即智能型机器人，是基于传感器信息来工作的机器人。它依靠简单的感觉装置获取作业环境和对象的简单信息，通过对这些信息的分析、处理，作出一定的判断，对动作进行反馈控制。

第三代机器人，即智能机器人。这是一类具有高度适应性的有一定自主能力的机器人，如能听懂多种语言的指路机器人。智能机器人有四种机能：行动、感知、思维和人机交换。①行动机能。施加于外环境和对象的，相当于人的手、足的动作机能。②感知机能。获取外部环境和对象的状态信息以便进行自我行为监视的机能。③思维机能。求解问题的认知、推理、记忆、判断、决策、学习等机能。④人机交换机能。理解指示命令、输出内部状态、与人进行信息交换的机能。简言之，智能机器人的“智能”特征就在于它具有与外部世界——环境、对象和人相协调的工作机能。

智能机器人的主要研究内容是围绕上述四种机能进行的，大致可归纳为：①操作与移动；②传感器及其信息处理；③控制；④人机交互；⑤体系结构；⑥人工智能；⑦应用研究。

智能机器人一般由以下几部分组成（见图）：①任务规划系统：根据世界模型和任务描述自动寻求控制机器人动作的某种有序组合，把初始的作业状态转变为满足一定条件的目标状态；②理解系统：把视觉等传感器获取的环境特征信息处理成一种明确而有意义的世界模型描述，为任务规模提供知识；③自适应控制：机器人是一个复杂的非线性动力学系统，其负载及惯量随机器人的空间位置和姿态的改变而在大范围内变化，为取得好的动态响应和跟踪精度，采用自动修改参数的控制算法；④语言生成：把规划系统产生的动作序列，自动生成一种面向运动的语言；⑤知识库：存储描述各种环境、对象、约束条件、规划等结构数据并运用这些数据进行解释与推理。



智能机器人组成

智能机器人与人工智能学科密切相关，由于人工智能技术还未能提供实现机器智能的有效理论和方法，智能机器人的研究还处于初级阶段，研究的目标一般围绕感知、行动、思考三个问题。实验原型主要有：①自动装配机器人。具有对部件的三维视觉识别和定位、自动规划装配序列、避碰、多操作器协调等功能。②移动式机器人。具有室内、外自主导航，路径规划，避碰，野外、壁面环境下移动，基于感觉的取样操作和检测排除故障等功能。③水下机器人。具有深水潜游，有缆遥控，水下清理、维修或敷设等功能。

机器人应用的广度已无所不及，综合起来大致涉及以下领域：①工业生产：一般指搬运、焊接、喷漆、装配零件、模具生产等；②应用服务：用于核辐射、海洋及空间航天飞机、水下等环境及建筑、医用、清洁、保安、导盲、导游、农业除草等；③军事领域：一般采用自治式移动机器人以适应环境复杂多变场合，主要用于军事侦察、作战、支援、防化、扫雷等。

参考书目

张效祥. 计算机科学技术百科全书. 2 版. 北京：清华大学出版社，2005.

zhineng kongzhi

智能控制　(intelligent control)　具有拟人智能控制特性，并采用智能控制方法的新型控制。还有一种广义的定义：具有拟人智能控制特性，或采用智能控制方法的控制。拟人控制特性即模拟、延伸、扩展人的智能特性。人的智能包括个体和群体的多层次、多方面的智能特征，包括：自感知、自认知、自辨识、自诊断、自协调、自镇定、自适应、自组织、自修复、自推理、自学习、自联想、自寻优、自规划等。拟人智能在一定的环境条件下和时间、空间范围内，可以类似于、低于或高于人的智能。例如，利用人工智

能的多级专家系统和技术，可以集成专家群体的知识和经验，在解决某些问题上可能有高于个别专家的水平。智能控制方法和技术包括知识控制、神经网络控制、图像控制、声音控制、语音控制等。知识控制建立控制者的专家模型或知识模型，建立知识表达方法（产生式规则等），构成专家控制（expert control）系统或知识控制（knowledge control）系统。图像控制基于图像模型的识别，例如，根据地面目标图像信息进行卫星或巡航导弹控制。声音控制基于声音模型的鉴别，例如，对球磨机运行时发出的“磨音”进行鉴别，提取特征，从而进行控制。语音控制基于语音模型的理解，用于某些武器系统、盲人服务设备等。有一种意见认为，模糊控制也是一种智能控制。

智能控制与传统控制（后者与经典控制理论和现代控制理论对应）的主要区别：①传统控制基于被控对象的严格的数学模型。适合于结构与参数比较固定的相对简单的控制问题。智能控制需要广义模型（知识模型、神经模型等），一般不要求严格的数学模型，适合于难以建立数学模型的或结构、参数变化比较频繁的系统。②智能控制适于处理具有高度复杂性、信息不完全性、不确定性的控制问题，传统控制处理这类问题有相当的困难。③传统控制要求实现“精确”控制，智能控制要求实现“满意”控制。

智能控制在20世纪60年代提出，80年代后得到快速发展，派生出很多分支，取得了丰硕的理论成果，并在很多工业系统中得到了成功的应用。但作为一个新的学科，智能控制还是处于发展阶段。

参考书目

蔡自兴．智能控制．北京：电子工业出版社，2004.

zhihou buchang

滞后补偿

滞后补偿（lag compensation） 为改善控制系统的稳态性能采用滞后网络对系统进行的补偿。滞后网络用得最广泛的是电网络，也可能是机械的、气动的、液压的或者是它们的混合形式的网络。它输出正弦信号的相位滞后于输入正弦信号的相位，且滞后相位角是输入正弦信号频率的函数。

图1（a）为一电滞后网络，其传递函数为

$$G_c(s)=\frac{E_o(s)}{E_i(s)}=\frac{Ts+1}{\beta Ts+1}=\frac{1}{\beta}\left(\frac{s+\dfrac{1}{T}}{s+\dfrac{1}{\beta T}}\right)$$

式中 $T=R_2C_2$，$\beta=\dfrac{R_1+R_2}{R_2}>1$。相应的频率特性为

$$G_c(j\omega)=\frac{j\omega T+1}{j\omega\beta T+1}$$

图1（b）为这一滞后网络的极坐标图。图1（c）为其对数坐标图，$\beta=10$，其转角频率为 $\omega=1/T$ 和 $\omega=1/\beta T$。

滞后网络基本上是一个低通滤波器，即低频信号可以通过，高频信号被滤掉。滞后补偿可以改善系统的稳态精度，但使动态响应有所减慢。采用滞后补偿是利用滞后网络在高频段的衰减特性，而不是利用网络的相位滞后特性。后者没有补偿作用，相位滞后不是目的。

举一个用根轨迹法设计的例子。系统的开环传递函数为 $GH=\dfrac{k}{s(s+2)^2}$。设 $k=3$ 时，系统具有适当的动态响应，但稳态速度误差系数太小，$K_v=0.75$，稳态误差大，试选一滞后补偿装置将 K_v 增为5。

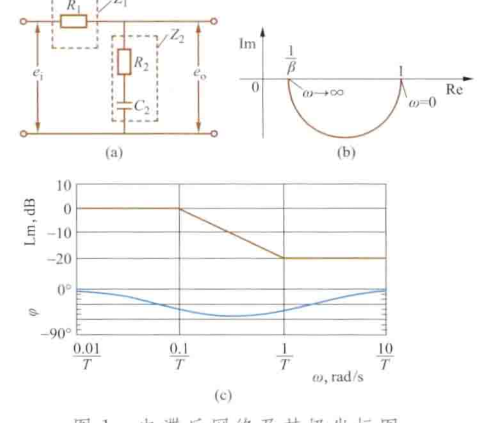


图1　电滞后网络及其极坐标图和对数坐标图

（a）网络图；（b）极坐标图；（c）对数坐标图

未补偿系统的根轨迹图如图2（a）所示。可以选用传递函数为 $G_c=\dfrac{s+0.1}{s+0.015}$ 的滞后网络，因为 $K_v'=K_vG_c(0)=\dfrac{0.75\times0.1}{0.015}=5$（见稳态误差）。图2（b）示出补偿后的根轨迹图，动态响应基本上不受影响。

滞后补偿也可用频率响应法进行设计。

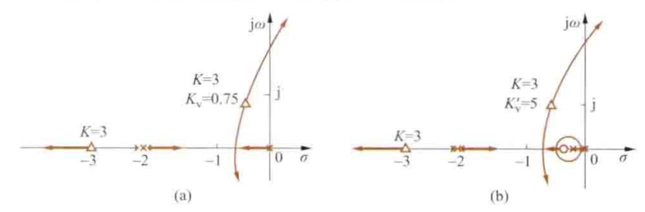


图2　滞后补偿的例子

（a）补偿前根轨迹图；（b）补偿后根轨迹图

zhihou chaoqian buchang

滞后-超前补偿

滞后-超前补偿（lag-lead compensation） 为同时改善控制系统的稳态性能和动态响应，采用滞后-超前网络对系统进行的补偿。滞后-超前网络用得最广泛的是电网络，也可能是机械的、气动的、液压的或者是它们的混合形式的网络。它的输出正弦信号的相位移是输入正弦信号频率的函数。当输入正弦信号的频率从零起增大时，越过某个 $\omega=\omega_1$，输出正弦信号的相位从滞后变到超前，即相位滞后和超前发生在不同的频带上。超前补偿主要改善系统的瞬态响应速度，而滞后补偿可使系统的稳态性能获得改善，但却使响应速度有所减慢。滞后-超前补偿兼有滞后补偿和超前补偿的特性。

图（a）示一电滞后-超前网络，其传递函数为

$$G_c(s)=\frac{E_o(s)}{E_i(s)}=\frac{(T_1s+1)(T_2s+1)}{\left(\dfrac{T_1}{\beta}s+1\right)(\beta T_2s+1)}$$

$$=\frac{s+\dfrac{1}{T_1}}{s+\dfrac{\beta}{T_1}}\times\frac{s+\dfrac{1}{T_2}}{s+\dfrac{1}{\beta T_1}}(\beta>1)$$

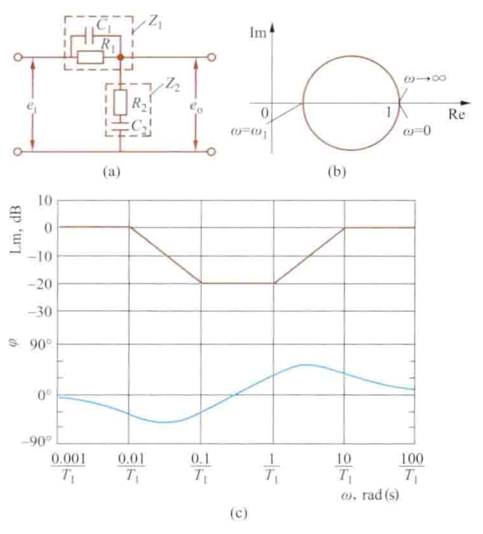
式中 $T_1=R_1C_1$，$T_2=R_2C_2$，$\dfrac{T_1}{\beta}+\beta T_2=R_1C_1+R_2C_2+R_1C_2(\beta>1)$。$G_c(s)$ 表达式中第一项产生超前网络作用，第二项产生滞后网络作用。

图（b）为这一滞后-超前网络的极坐标图。可以看出，

当 $0<\omega<\omega_1$ 时，它起滞后网络的作用；而当 $\omega_1<\omega<\infty$ 时，它起超前网络的作用。相应于相角等于 0 那点的频率 ω_1 为

$$\omega_1=\frac{1}{\sqrt{T_1T_2}}$$

图（c）是当 $\beta=10$ 和 $T_2=10T_1$ 时，滞后-超前网络的对数坐标图。在低频段和高频段，幅频特性曲线都为 0dB，即无衰减，而中间有一个频带衰减显著，因此滞后—超前网络可视作“带除滤波器”。



电滞后-超前网络及其极坐标图和对数坐标图

(a) 网络图；(b) 极坐标图；(c) 对数坐标图

举一个用根轨迹法设计的例子。一全负反馈系统，其被控对象的传递函数为 $G_2=K/[(s+8)(s+14)(s+20)]$，设计补偿装置，性能指标的要求如下：

①过调量≤5%；②10%～90%上升时间 $T_r\leqslant150$ms；③稳态位置误差系数 $K_p>6$。

$\zeta\geqslant0.7$ 的一对共轭极点，可以满足过调量≤5%的要求（见动态响应）。同时，从响应曲线上可以看出，对应于 $\zeta=0.7$，10%～90%上升时间约为 $\omega_nT_r=2.2$。为了满足第二条要求，应有 $T_r=2.2/\omega_n\leqslant0.15$s 或 $\omega_n>14.7$ rad/s，现选用 $\omega_n=17$，使有一些裕量。

对于 $\zeta=0.7$，$\omega_n=17$ 的二阶系统，s_1 和 s_1^* 是方程 $s^2+2\zeta\omega_ns+\omega_n^2=0$ 的根，$s_1=-12+\mathrm{j}12$，$s_1^*=-12-\mathrm{j}12$。在 s 平面上计算 $\angle G_2(s_1)=-245°$。要使 s_1 处于根轨迹上，应使幅角为 $-180°$（见根轨迹法），即需要加 65°的超前校正。现选择零点在 $s=-8$，极点在 $s=-25$ 的超前网络，其超前相角恰好是 $108°-43°=65°$，于是加上超前补偿的开环传递函数为

$$G_2G_q=\frac{K}{(s+8)(s+14)(s+20)}\times\frac{(s+8)}{(s+25)}$$

$$=\frac{K}{(s+14)(s+20)(s+25)}$$

为了满足在 s_1 点的幅值判据，算出来的 K 值应为 3100。但在此情况下，稳态位置误差系数 $K_p=3100/(14\times20\times25)=0.443$（见稳态误差），远低于要求的指标。这就是说，用了超前补偿，前两条要求是满足了，后一条要求没有满足。

因此，还要再考虑滞后补偿。现选 $G_h=\dfrac{s+1}{s+0.075}$，总的补偿是 $G_qG_h=\dfrac{(s+8)\ (s+1)}{(s+25)\ (s+0.075)}$，总的开环传递函数为 $GH=3100(s+1)/[(s+0.075)(s+14)\times(s+20)(s+25)]$，于是，所提出的全部要求都已满足。

滞后-超前补偿也可用频率响应法进行设计。

zhongduan xitong

中断系统（interrupt system） 处理机完成中断功能的机构。在程序运行时，若系统外部、内部或现行程序本身出现急需处理的事件，处理机必须暂停当前程序的运行，保护处理机现场状态，并转去执行有关服务程序处理这些事件，处理完后，恢复现场状态，转回现行程序继续运行。这一过程称“中断”。

中断系统由专门的硬件和软件构成。硬件包括中断事件的监测与识别、中断的控制、中断向量地址形成以及中断优先权仲裁等逻辑部件。软件包括中断控制和中断服务程序等。

功能 现代计算机中采用中断系统的主要目的是提高计算机系统效率、维持系统可靠正常工作、满足实时处理要求和提供故障现场处理手段。①提高计算机系统效率。计算机系统中处理机的工作速度远高于外围设备的工作速度。通过中断可以协调它们之间的工作。当外围设备需要与处理机交换信息时，由外围设备向处理机发出中断请求，处理机及时响应并作相应处理。不交换信息时，处理机和外围设备处于各自独立的并行工作状态。②维持系统可靠正常工作。现代计算机中，程序员不能直接干预和操纵机器，必须通过中断系统向操作系统发出请求，由操作系统来实现人为干预。主存储器中往往有多道程序和各自的存储空间。在程序运行过程中，出现越界访问，会引起程序混乱或相互破坏信息。为避免这类事件的发生，由存储管理部件进行监测，一旦发生越界访问，向处理机发出中断请求，处理机立即采取保护措施。③满足实时处理要求。在实时系统中，各种监测和控制装置随机地向处理机发出中断请求，处理机随时响应并进行处理。④提供故障现场处理手段。处理机中设有各种故障检测和错误诊断的部件，一旦发现故障或错误，立即发出中断请求，进行故障现场记录和隔离，为进一步处理提供必要的依据。

中断源分类 导致处理机中断的原因是多方面的，一台处理机有多个中断源。按其性质可分为硬件故障中断，输入/输出中断，程序性中断，外中断和调用管理程序中断五类。①硬件故障中断。包括电源故障、运算器误动作、主存或通道中数据传送出错、处理机其他硬件故障等。②输入/输出中断。键盘输入时，每按一次键，请求处理机取走已输入的信息，打印机在输出时，每完成一次打印动作，向处理机请求送出下一个待打印的信息。③程序性中断。指令中出现非法操作码，寻址范围超过主存容量，结果溢出以及在程序调试中到达预定跟踪的状态等都是由现行程序本身的异常事件引起的。④外中断。来自控制台中断开关、计数器、定时器及其他设备的中断。这类中断实时性强，处理简单。⑤调用管理程序中断。用户程序中利用“调用管理程序”指令（或称“访管”指令）发出中断请求，实现用户程序和操作系统之间的联系。前四类中断是随机的，称强迫性中断；第五类中断是程序员控制的，称自愿性中断。

中断优先权 在某一时刻有几个中断源同时发出中断请求时，处理器只响应其中优先权最高的中断源。当处理机正在运行某个中断服务程序期间出现另一个中断源的请求时，如果后者的优先权低于前者，处理机不予理睬，反之，处理机立即响应后者，进入所谓的“嵌套中断”。中断优先权的排序按其性质、重要性以及处理的方便性决定，由硬件的优

先权仲裁逻辑或软件的顺序询问程序来实现。

中断控制 通过处理机提供的专用指令实现中断的控制。“允许中断”和“禁止中断”指令可控制处理机能否响应中断，对应每个中断源设有一个屏蔽位，利用“中断屏蔽”指令对每个屏蔽位置1或置0，以实现对每个中断源的控制。“中断屏蔽”指令可局部地调整中断优先权，提高中断控制的灵活性。

中断过程 按照事件发生的顺序，中断过程包括：①中断源发出中断请求；②判断当前处理机是否允许中断和该中断源是否被屏蔽；③优先权排队；④处理机执行完当前指令或当前指令无法执行完，则立即停止当前程序，保护断点地址和处理机当前状态，转入相应的中断服务程序；⑤执行中断服务程序；⑥恢复被保护的状态，执行“中断返回”指令回到被中断的程序或转入其他程序。上述过程中前四项操作是由硬件完成的，后两项是由软件完成的。

向量中断 对应每个中断源设置一个向量。这些向量顺序存在主存储器的特定存储区。向量的内容是相应中断服务程序的起始地址和处理机状态字。在响应中断时，由中断系统硬件提供向量地址，处理机根据该地址取得向量，并转入相应的中断服务程序。

zhongjianjian

中间件 (middleware)

在网络环境下位于操作系统、数据库系统等系统软件之上，应用软件层次之下，起着承上启下连接作用的一类独立的分布式软件。用于解决异构网络环境下分布式应用软件的互联互通与互操作。中间件支持标准的接口和协议，提供跨网络、不同硬件、不同操作系统上的应用之间的交互，在不同的技术之间共享资源，避免重复开发。适用于网络基础通信、数据访问、应用集成等场合。

特点 ①独立性和应用支撑：能够独立运行并自主存在，为所支撑的上层应用系统提供平台环境；②不同系统间的软件复用和互操作：传统中间件以企业对象组件为基础，实现一个企业网络内的不同系统之间的复用，无法支持不同企业的系统之间的复用。现代中间件是基于服务的中间件，通过标准交互协议，实现服务封装、服务组件的组装、重组和可配置的服务复用，实现不同企业间的全球复用。③松散耦合关系：通过分布式对象将业务逻辑、网络连接、数据转换相分离，或基于面向服务的架构（SOA架构）完全解耦。

分类 ①应用服务类中间件：为应用系统提供一个综合支撑平台，包括对象请求代理中间件、事务监控交易类中间件、应用服务器中间件等；②应用集成类中间件：提供各种不同网络应用系统间的消息通信、服务和数据集成，包括消息中间件、企业集成、企业服务总线；③业务架构类中间件：对应用领域中业务层面上的业务流程、模型、业务规则等提取共性形成的中间件，包括业务流程中间件、业务管理中间件、业务交互中间件等。

zhongyang chuliqi

中央处理器 (central processing unit, CPU)

计算机执行指令操作和运算操作的部件，简称CPU。它是计算机硬件系统的核心，控制整个计算机系统的操作。计算机系统中各种运算、存取存储器和输入/输出操作都由中央处理器执行和处理。

中央处理器包括运算器和控制器。此外，通用寄存器和堆栈也是两个重要部件。

运算器 执行算术运算和逻辑运算的部件，又称算术逻辑部件。算术运算包括加、减、乘、除四则运算；根据数据的不同表示方法，又分为二进制和十进制、定点和浮点、原码、反码和补码运算等；根据数的结构类型，又分为标量运算和向量运算。逻辑运算包括：“与”“或”“非”“异或”和“比较”等操作。

运算器的字长有二进制8位、16位、32位或64位等。

运算器主要包括寄存器和执行部件、移位线路。①寄存器。包括接收和保存一个操作数的接收寄收器，保存另一个操作数和运算结果的累加寄存器，乘、除运算时保存乘数或商数的乘商寄存器等。②执行部件。包括一个并行加法器和各种类型的输入控制门电路。③移位线路实现算术、逻辑移位功能。

运算器的操作是在控制器控制下进行的。

控制器 处理器执行指令过程中，为各个功能模块提供微操作控制信号的部件。控制器包括指令寄存器、指令计数器、译码电路、状态寄存器、定时系统和微操作控制信号形成电路等。

指令计数器存放指令的地址，根据此地址从主存储器读取指令，并存入指令寄存器，经译码电路确定指令功能，在定时系统提供的节拍信号控制下有序地向存储器、运算器以及各寄存器发出一系列微操作控制信号（运算器的加/减、存储器的读/写、寄存器的清零/置数、移位等），实现指令规定的功能。完成一条指令所经过的节拍周期之和称指令周期，是表征处理器速度的重要参数。指令执行后的状态信息（结果是否为零、是否溢出、有无进位等）存入状态寄存器，为系统管理指令和条件转移指令等提供必要的状态信息，以便中央处理器实现对系统的管理或程序的分支。中断系统的硬件支持也是控制器的重要组成部分，包括中断请求寄存器、中断屏蔽寄存器以及中断优先级仲裁逻辑等。

通用寄存器 主要作用是：①暂存操作数或中间结果，以减少处理器访问主存储器的频度，提高处理指令执行的速度。这是因为通用寄存器的读/写操作可以在处理器一个时钟周期内完成，远小于主存储器的存取周期。②输入/输出过程中数据缓冲，以便实现处理机与外围设备之间的同步和数据格式的匹配。③兼作某些特殊寄存器用（变址寻址方式中的变址寄存器，堆栈结构中的堆栈指针等）。

堆栈 按“后进先出”规则存取信息的特殊存储器，有“栈底”和“栈顶”两个指针寄存器。“栈底”指向堆栈的底部地址，“栈顶”指向堆栈顶部地址。堆栈的读/写操作，总是针对“栈顶”所指的单元，操作后“栈顶”指针自动递增或递减，根据软件设置的堆栈长度来判定是否溢出。堆栈可以由设置在主存储器的某一区域或用一个独立的存储器构成。

堆栈主要应用于：①对零地址指令系统的处理器，为运算器提供操作数和存放运算结果；②在中断系统中压入或弹出所保护的断点地址和处理机状态信息；③在子程序调用和子程序返回指令中保护和恢复子程序返回地址。利用堆栈，可以方便

地实现多级嵌套中断、多重子程序嵌套和递归调用。

zhongduan shebei

终端设备 (terminal) 通过通信线路和通信设备发送程序和数据给计算机或接收计算机输出的设备，简称终端。它是20世纪60年代中期随大型计算机分时处理系统的建立而发展起来的。一般在地区分散的工作场所或办公室的用户设置终端设备。终端是人机接口设备，因而是交互式的。

组成 通常由键盘、终端控制器和显示器组成，故又称显示终端。①键盘。由一组按键组成，供用户输入数据和命令。②终端控制器。由微处理器、存储器和显示控制器组成。其功能为：接收并解析键盘输入；控制通信口的数据输出输入；支撑复杂图形变换运算，存储用户图形数据，建立终端显示文档；卸载主机图形处理负荷，提高实时响应。③显示器。显示键盘输入字符、图形。

种类 终端设备主要有文字/字符显示终端、汉字显示终端、图形显示终端、彩色图像终端等。终端控制技术向多媒体人机接口方向发展，使终端多功能化。

标准 终端要与多种主机相连接，依据工作特点可划分为通信连接层、文字处理层、图形处理层三个层次：①通信连接层。通常采用标准串行口或标准总线与主机连接，常用的是RS-232C、USB串行口。②文字处理层。英文语系国家的计算机，终端与主机信息交换采用ASCII码。东方语系国家的计算机，终端采用了与英文兼容开发的策略，如中国开发的“汉卡”。③图形处理层。图形显示终端连机接口标准化是计算机图形系统标准化的一部分。

zhu cunchuqi

主存储器 (main memory) 在主机内部存放指令和数据，由中央处理器随机访问的存储器，亦称内存储器，简称主存，又称内存。主存储器的每个单元都有自己的编码地址，中央处理器按地址访问任一单元。主存储器是计算机的必备部分，现代计算机系统是以主存储器为中心，通过总线可与中央处理器、外围设备等交换数据。主存储器的主要性能指标是存储容量和存取速度。

主存储器主要由四部分组成：①存储单元集合体，简称存储体，用于存放二进制形式的程序和数据；②地址寄存器及地址译码器，用于存放由中央处理器送来的地址，并对它进行译码，产生地址驱动信号；③读写控制电路，按地址寄存器中的内容控制给定地址单元的读写操作；④数据寄存器，用于存放欲写入存储体中的数据，或暂存从存储体中读出的数据。

提高主存储器存取速度的途径主要有：①元件的更新换代。在20世纪50～60年代主要用磁芯存储体来构成主存储器，进入70年代逐步用半导体存储器来取代磁芯存储器，以提高主存的存取速度和容量，并简化存储器的制作工艺。②计算机体系结构的改进。采用多模块的交叉访问技术，中央处理器可以同时从多个能并行工作的存储模块中，取出指令和数据，从而提高并行操作程度，缩短指令和数据的平均存取时间。

zhujiti

驻极体 (electret) 一种具有持久性极化的固体电介质。驻极体可以在周围空间产生电场，因此是可以类比于永磁体的一种带电体。驻极体效应只存在于电导非常低或剩余极化相当稳定的电介质中。要使电介质显示出驻极体效应必须对材料进行预极化或电荷注入等处理。用钛酸钡陶瓷等铁电材料可以制成驻极体。驻极体中存在着由剩余极化引起的束缚电荷和表层附近的自由电荷，二者符号相反。一般来说，驻极体的有效电荷 σ 的变化取决于束缚电荷和自由电荷的变化。

驻极体的性质主要表现在驻极体所建立的电场和驻极体的压电效应等方面。当电极与驻极体接触很紧密时（如烧渗银电极），驻极体内部的电场为零。通常为了防止驻极体在存放过程中失效，总是在这种状态下保存驻极体。此时驻极体的压电效应是由于它的表面有效电荷 σ 在外界应力作用下发生变化所致，这种压电效应被称为驻极体的真实压电效应。当电极和驻极体有不很大的间隙时，驻极体内外的电场强度都很高，此时驻极体的压电效应仅与驻极体和电极之间的间隙变化有关，这种压电效应被称为准压电效应。

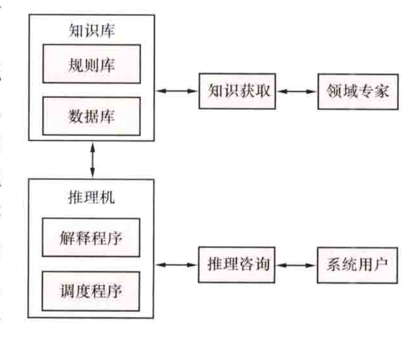
驻极体的用途广泛，包括用于扬声器、耳机、传声器、送话器、各式换能计、放射性剂量计等。

zhuanjia xitong

专家系统 (expert systems, ES) 应用人工智能技术的一种智能化计算机软件，又称为基于知识型的系统。它能应用知识和推理来解决特定专业领域的问题，而这些问题因其困难程度原来是需要专家才能解决的，因此它的解题过程可以看作为一个专家运用专业知识的模型。

发展 直到20世纪60年代末，人工智能的研究一直企图设计出通用的问题求解器，所采用的方法是搜索。但是，在解决实际问题上，其搜索量之大，即使应用最大最快的计算机也不能完成。于是另辟蹊径，研究针对特定问题的求解器，即专家系统。最早出现的两个专家系统是DENDRAL和MACSYMA。DENDRAL系统在输入物质的质谱和核磁共振的数据后，可以确定该物质的化学分子结构。MACSYMA系统能将复杂的数学表达式进行代数运算后加以简化。此后又出现了能诊断传染病并开处方的MYCIN系统，它非常符合医师们的诊断和处方。由此专家系统引起学术界的重视。20世纪70年代后期以来，在科学研究、医学、化学、生物、工程、法律、农业、商业、教育和军事等各个领域中开发出众多的专家系统。专家系统被认为是人工智能中最具应用潜力的分支。80年代中期起，专家系统从实验室应用转向商品化大规模的推广，到90年代已发展成为一种重要的软件产品。在专家系统广泛应用于各个领域的基础上，分布式专家系统和利用Agent理论与软件体系结构理论构成的新型专家系统也诞生了。

组成 专家系统的性能水平，基本上由它所拥有的知识的数量和质量决定。现在的技术，还不能够对于包罗万象的大量知识进行管理，所以专家系统只能局限于拥有一个狭窄领域内



专家系统的组成

的知识，并解决这个领域内的问题。

知识库和推理机是专家系统的核心部分。

(1) 知识库：针对某一（或某些）领域问题求解的需要，采用某种（或某些）知识表示方式在计算机中存储、分类组织、管理、维护和使用的互相联系的知识集合。它包括事实（数据）、与领域相关的理论知识和启发性知识，如某领域内的有关定律、定理和运算法则以及常识性知识等。事实是描述客观世界的命题。启发性知识是专家个人解决问题作出判断所用的经验知识，通常表示为如下的规则形式：

"如果：<前提>，于是：<结论>"

应用规则的推理是：当前提与知识库中的一些事实相匹配时，采取结论所指示的行动，通常是改变或增添新的事实于知识库。知识库中的知识也可以用其他方式表达，如谓词逻辑、语义网络和框架等。

(2) 推理机：推理是指依据一定的规则从已有的事实推出结论的过程。推理机控制知识库中的知识对事实进行一连串的推理，直到达到目标。当有多个知识可以与事实相匹配时，它运用一定的策略从中只挑选一个知识予以"激发"，实现基于知识的推理。

在传统的程序中，领域知识通过数学模型蕴涵于算法之中，是和程序固定在一起的。但是专家系统中的领域知识是独立于控制机构而存于知识库中，因此可以方便地增添和修改，不影响程序，这就是系统的"柔性"。

特点　专家系统具有下述特点：启发性，透明性和灵活性。①启发性。不仅能使用逻辑知识，也能使用启发性知识，运行规范的专门知识和直觉的评判知识进行判断、推理和联想，实现问题求解。②透明性。用户在对专家系统结构不了解的情况下，可进行交互，并了解知识的内容和推理思路，系统还能回答用户的一些有关系统自身行为的问题。③灵活性。专家系统的知识与推理机构的分离，使系统不断接纳新的知识，从而确保系统内知识不断增长以满足不同的需要。

建立步骤　专家系统的建立包括知识库设计和推理机设计。

知识库设计的内容有：①确定知识类型：叙述性知识，过程性知识，控制性知识。②确定知识表达方式。③知识库管理系统的设计：实现规则的保存、编辑、删除、增加、搜索等功能。

推理机设计的内容有：①选择推理方式。②选择推理算法：即各种搜索算法，如深度优先搜索、广度先搜索、启发式优先搜索等。

建造一个专家系统的过程常常通过专家系统的构造者（称为知识工程师）和人类专家之间的相互合作而完成。知识工程师从专家那里通过对话抽取他们求解问题的过程、策略和经验规则，然后把这些知识建造在专家系统之中。知识的获取是一项费时而又困难的任务，特别是知识的自动获取能力差，是开发专家系统工作的瓶颈。

参考书目

史忠植．高级人工智能．2版．北京：科学出版社，2006．

zhuangtai fankui

状态反馈

(state feedback)　见线性二次型最优控制。

zhuangtai guanceqi

状态观测器

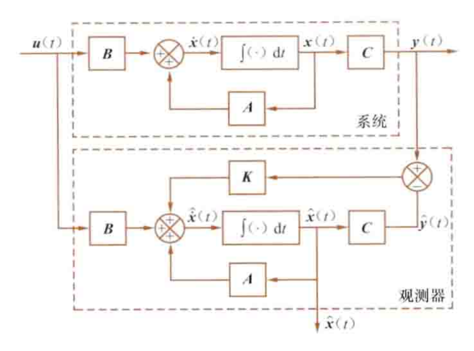
(state observer)　利用系统输出量和输入量来观测，或重构，或估计状态的装置，又称状态重构器或状态估计器。无论是调节器还是跟踪问题，实现最优控制都必须取得全部状态变量以实施状态反馈（见线性二次型最优控制），然而在工程实际中，往往有些状态变量难以甚至不能测到，只能获得次优控制，因此需要建立状态观测器以重构状态。

定常系统的方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), y(t) = Cx(t) \tag{1}$$

式中 x 为 n 维状态向量；u 为 p 维输入向量；y 为 q 维输出向量。

对于状态完全可观测系统，可构造一个状态观测器，其框图如图所示。



控制系统和状态观测器

状态观测器的动态方程为

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - K(\hat{y} - y); \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \tag{2}$$

亦即

$$\dot{\hat{x}} = (A - KC)\hat{x} + Bu + Ky \tag{3}$$

状态观测器是在等效模型的基础上，加入了以 KC 为反馈阵的从 $\hat{x}$ 到 $\dot{\hat{x}}$ 的负反馈系统。它有两个输入：一个是实际系统的控制作用 u；一个是实际系统的输出 y。它的输出就是估计状态 $\hat{x}$。

由式（1）、式（2）可得估计误差的动态方程

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} - \dot{x} &= A(\hat{x} - x) - K(\hat{y} - y) \\ &= (A - KC)(\hat{x} - x)\end{aligned} \tag{4}$$

其解为

$$\hat{x}(t) - x(t) = e^{(A-KC)t}[\hat{x}(t_0) - x(t_0)] \tag{5}$$

应使 $\hat{x}(t)$ 能迅速紧跟 $x(t)$，使得 $\lim_{t\to\infty}[\hat{x}(t) - x(t)] = 0$，$\lim_{t\to\infty}[\hat{y}(t) - y(t)] = 0$。应合理选择 K，使 $A-KC$ 的特征值具有负实部且其绝对值足够大，令 $\hat{x}(t) - x(t)$ 迅速趋近零。

zhuangtai kongjian biaodashi

状态空间表达式

(state-space representation)　由状态方程和输出方程构成，在状态空间中对控制系统作完整表述的公式。

连续系统的状态空间表达式　状态方程是由控制系统的状态变量和控制变量构成的一阶微分方程组。输出方程是该系统输出变量与状态变量和控制变量的函数关系式。它们一般表示为

$$\left.\begin{aligned}&\text{状态方程 } \dot{x} = f(x, u, t) \\ &\text{输出方程 } y = g(x, u, t)\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中 f，g 为向量函数；x 为 n 维状态向量；u 为 p 维控制向量；t 为时间变量；$\dot{x}$ 为状态变量关于 t 的一阶微分向量；y

为 q 维输出向量。

如果所描述的控制系统是线性的，则状态空间表达式为

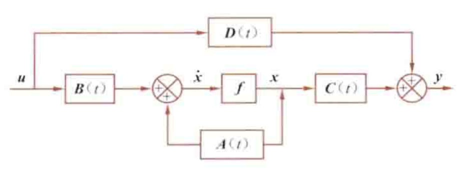
$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}(t)\boldsymbol{u}\end{aligned}\right\}\qquad(2)$$

式中 $\boldsymbol{x}\in R^n$；$\boldsymbol{y}\in R^q$；$\boldsymbol{u}\in R^p$。通常，$q\leqslant n$，$p\leqslant n$，$\boldsymbol{A}(t)$ 为 $n\times n$ 维系统矩阵，$\boldsymbol{B}(t)$ 为 $n\times p$ 维输入矩阵，$\boldsymbol{C}(t)$ 为 $q\times n$ 维输出矩阵，$\boldsymbol{D}(t)$ 为 $q\times p$ 维前馈矩阵。

如果式（1）中的函数 $\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{g}$ 或式（2）中的 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{D}$ 不依赖于时间变量 t，则该控制系统是定常的。线性定常控制系统的状态空间表达式为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}\end{aligned}\right\}\qquad(3)$$

式中矩阵 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 和 $\boldsymbol{D}$ 均为常数矩阵。图为式（2）所示的状态空间表达式表述的控制系统的框图。



状态空间表达式的系统框图

线性离散时间系统的状态空间表达式　线性离散时间系统的状态空间表达式为

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}(kT+T)&=\boldsymbol{G}(kT)\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{H}(kT)\boldsymbol{u}(kT)\\ \boldsymbol{y}(kT)&=\boldsymbol{C}(kT)\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{D}(kT)\boldsymbol{u}(kT)\end{aligned}\right\}\qquad(4)$$

式中 $k=0,1,2,\cdots$；T 为采样周期；$\boldsymbol{x}\in R^n$；$\boldsymbol{u}\in R^q$；$\boldsymbol{y}\in R^p$；$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{H}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{D}$ 为适当的维数。

如果控制系统又是定常的，则其状态空间表达式为

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}(kT+T)&=\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{H}\boldsymbol{u}(kT)\\ \boldsymbol{y}(kT)&=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(kT)+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(kT)\end{aligned}\right\}\qquad(5)$$

状态空间表达式的非唯一性及其变换　描述一个给定控制系统的状态向量不是唯一的，即可以选择不同的状态向量。因此，其状态空间表达式也不是唯一的。以线性定常连续控制系统为例，对其状态向量 $\boldsymbol{x}$ 作线性变换，使得 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{T}\bar{\boldsymbol{x}}$，其中 $\boldsymbol{T}$ 为任何非奇异 $n\times n$ 维矩阵。若以 $\bar{\boldsymbol{x}}$ 为状态向量，则该系统的状态空间表达式为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\bar{\boldsymbol{x}}}&=\bar{\boldsymbol{A}}\bar{\boldsymbol{x}}+\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\bar{\boldsymbol{C}}\bar{\boldsymbol{x}}+\bar{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{u}\end{aligned}\right\}\qquad(6)$$

式中 $\bar{\boldsymbol{A}}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{T}$；$\bar{\boldsymbol{B}}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{B}$；$\bar{\boldsymbol{C}}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{T}$；$\bar{\boldsymbol{D}}=\boldsymbol{D}$。上述变换也称为坐标变换或基底变换。一个控制系统的状态空间表达式可以有许多不同的形式，但所有表达式的系统矩阵的特征值是不变的。一个 n 维的控制系统（即系统矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为 $n\times n$ 维矩阵）有且仅有 n 个特征值。对实常数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 而言，其 n 个特征值或为实数，或为共轭复数对。如果 $\boldsymbol{A}$ 是实对称阵，则其特征值必为实数。为了分析和综合的简便，规定了称为规范型的几种状态空间表达式。

状态空间表达式的求解　对于线性定常控制系统，如果假定它的初始状态 $x(0)=0$，那么进行拉普拉斯变换后其状态空间表达式可以表示为

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{X}(s)&=(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}(s)\\ \boldsymbol{Y}(s)&=[\boldsymbol{C}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}+\boldsymbol{D}]\boldsymbol{U}(s)\end{aligned}\right\}\qquad(7)$$

式中 $\boldsymbol{I}$ 为 $n\times n$ 维单位矩阵；s 为复变数；$(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}=\boldsymbol{W}_x(s)$，称为输入-状态传递函数矩阵；$\boldsymbol{C}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}+\boldsymbol{D}=\boldsymbol{W}(s)$，称为输入-输出传递函数矩阵［不少文献中记作 $\boldsymbol{G}(s)$］。一个线性定常控制系统的输入-输出传递函数矩阵是不随状态空间表达式的不同而改变的。

对状态空间表达式求解就是解一阶微分方程组。假定状态空间表达式有解且有唯一的解，则式（2）所示线性时变控制系统状态空间表达式的解为 $\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{\Phi}(t,t_0)\boldsymbol{x}(t_0)+\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{\Phi}(t,\tau)\boldsymbol{B}(\tau)\boldsymbol{u}(\tau)\mathrm{d}\tau$。式中前面一部分是初始时刻状态 $\boldsymbol{x}(t_0)$ 的转移，后面一部分是由控制作用激励的转移。如式（3）所示的线性定常控制系统状态空间表达式的解为 $\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{\Phi}(t-t_0)\boldsymbol{x}(t_0)+\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{\Phi}(t-\tau)\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(\tau)\mathrm{d}\tau$。$\boldsymbol{\Phi}(t,t_0)$ 和 $\boldsymbol{\Phi}(t-\tau)$ 称为状态转移矩阵。

连续系统状态空间表达式的离散化　在利用计算机求解连续时间控制系统的状态空间表达式时，或者对连续受控对象实行计算机控制时，可以把连续时间控制系统变换为离散时间控制系统。此时两个状态空间表达式之间满足如下条件

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{G}(kT)&=\boldsymbol{\Phi}[(k+1)T,kT]\\ \boldsymbol{H}(kT)&=\int_{kT}^{(k+1)T}\boldsymbol{\Phi}[(k+1)T,\tau]\boldsymbol{B}(\tau)\mathrm{d}\tau\\ \boldsymbol{C}(kT)&=[\boldsymbol{C}(t)]_{t=kT}\\ \boldsymbol{D}(kT)&=[\boldsymbol{D}(t)]_{t=kT}\end{aligned}\right\}\qquad(8)$$

如式（4）所示的初始时刻为 hT 的线性离散时变控制系统状态空间表达式的解为 $\boldsymbol{x}(kT)=\boldsymbol{\Phi}(kT,hT)\times\boldsymbol{x}(hT)+\sum_{i=h}^{k-1}\boldsymbol{\Phi}[kT,(i+1)T]\boldsymbol{H}(iT)\boldsymbol{u}(iT)$。如式（5）所示的初始时刻为 hT 的线性离散定常控制系统状态空间表达式的解为 $\boldsymbol{x}(kT)=\boldsymbol{G}^k\boldsymbol{x}(hT)+\sum_{i=h}^{k-1}\boldsymbol{G}^{[k-(i+1)]}\times\boldsymbol{H}\boldsymbol{u}(iT)$。

控制系统的实现　对于结构和参数已知的控制系统，可以根据系统运动的规律（物理的、化学的、生物的或社会的等）直接建立其状态空间表达式。例如，根据框图或高阶微分方程式建立系统的状态空间表达式。但如果系统内部结构不知道或不完全知道，也得不到它的高阶微分方程式，则需要用其他的方法建立。可行的办法是由实验确定系统的输入-输出特性，例如传递函数矩阵或冲激响应函数阵，然后导出相应的状态空间表达式。这样的方法称为实现问题。

对于线性定常控制系统，实现问题的基本属性为：

（1）如果对给定的一个传递函数矩阵 $\boldsymbol{W}(s)$，找到一个状态空间表达式

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}&=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}\end{aligned}\quad\text{简写为}\ (\boldsymbol{A},\ \boldsymbol{B},\ \boldsymbol{C},\ \boldsymbol{D})\right\}\qquad(9)$$

使 $\boldsymbol{W}(s)=\boldsymbol{C}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}+\boldsymbol{D}$ 成立，则称（$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{D}$）为具有传递特性 $\boldsymbol{W}(s)$ 的系统的一个实现。它本质上是一个状态空间领域内的假想结构，与真实系统具有相同的传递特性。

（2）并不是任意给定的 $\boldsymbol{W}(s)$ 都可以找到其对应的状态空间表达式的。要满足可实现性条件：$\boldsymbol{W}(s)$ 的元素（传递函数）$w_{ik}(s)$，$i=1,2,\cdots,q$；$k=1,2,\cdots,p$。其分子多项式的次数必须低于或等于分母多项式的次数，对于定常系统，$w_{ik}(s)$ 中分子、分母多项式的系数均为实常数。

（3）实现不是唯一的，即状态空间表达式不是唯一的。它们可以是代数等价的或代数不等价的。

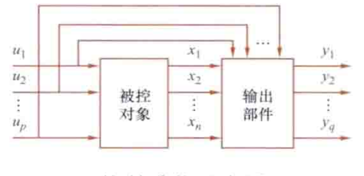
（4）对于给定的 $\boldsymbol{W}(s)$，一定存在一类维数最低的实现，

称为最小实现。它反映了 $\boldsymbol{W}(s)$ 的假想结构的最简形式。最小实现的充要条件是（$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{D}$）为完全可控和完全可观测的。最小实现也不是唯一的。不同的最小实现，其维数相同且代数等价。如果真实系统不是完全可控和可观测的，最小实现在结构上只是代数等价于真实系统中可控且可观测的那一部分。

zhuangtai kongjianfa

状态空间法　（state-space method）　建立在状态变量描述基础上的，揭示控制系统内在运动规律的一种时域分析方法。状态空间法包括给出控制系统在状态空间的描述，分析控制系统的运动规律，讨论控制系统的可控性和可观测性，以及分析控制系统稳定性等。状态空间法应用于控制系统的最优控制、最优估计、系统辨识和适应控制等方面。

如图所示一控制系统，其中 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为控制系统的状态变量；$y_1, y_2, \cdots, y_q$ 为控制系统的输出变量；$u_1, u_2, \cdots, u_p$ 为控制变量（也称输入变量）。状态变量是完全表征控制系统运动状态的一组变量（通常取维数最小的）中的每个变量，也可把这 n 个状态变量看作一个 n 维状态向量（简称状态）x 的 n 个分量。由 x_1 轴，x_2 轴，…，x_n 轴所组成的 n 维空间称为状态空间。同理，也可把 p 个控制变量看作一个 p 维的控制向量（也称输入向量）u，q 个输出变量看作一个 q 维的输出向量 y。



控制系统示意图

分析控制系统的运动规律，即如果已知 $t=t_0$ 时刻的状态 $x(t_0)$，在给定控制作用 u 下，求解 $t \geqslant t_0$ 时的 $x(t)$。

控制系统的可控性是控制系统的状态是否可以由控制向量完全实现控制的属性。控制系统的可观测性是控制系统的状态是否可以由输出向量完全实行识别的属性。

基于状态空间法的控制系统稳定性分析就是采用李雅普诺夫方法判断控制系统的稳定性。

状态空间法不仅适用于线性定常的单输入-单输出的控制系统，也适用于多输入-多输出的、非线性的、时变的连续或离散的控制系统。

zhuangtai zhuanyi juzhen

状态转移矩阵　（state transition matrix）　用以左乘初始状态，使初始状态转移到新的状态的矩阵。用于控制系统的分析计算。

线性连续系统的状态转移矩阵　一个线性时变控制系统，其状态方程是

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}$$

式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量。当任何时刻 $t \geqslant t_0$，$t \in [t_0, t_a]$ 控制系统的状态为 $\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{\Phi}(t, t_0)\boldsymbol{x}_0$，式中 $\boldsymbol{x}_0$ 为初始时刻 t_0 控制系统的状态；$\boldsymbol{x}(t)$ 是初始状态 $\boldsymbol{x}_0$ 通过状态转移矩阵 $\boldsymbol{\Phi}(t, t_0)$ 的转移到达的状态。对于一个给定的控制系统，$\boldsymbol{\Phi}(t, t_0)$ 是唯一的。它是以 t 为自变量的 $n \times n$ 维函数矩阵，其中 t_0 为初始时刻，t 为所考察时刻。

线性定常控制系统状态方程为 $\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$，式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量。任何时刻 $t \geqslant t_0$，$t \in [t_0, \infty)$ 的状态为 $\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{\Phi}(t-t_0)\boldsymbol{x}_0$，其中 $\boldsymbol{x}_0$ 为初始时刻控制系统的状态；$\boldsymbol{\Phi}(t-t_0)$ 为状态转移矩阵，它的数学表达式为 $e^{\boldsymbol{A}(t-t_0)}$，称为矩阵指数函数。为使表达式简洁，取 $t_0=0$，则有 $e^{\boldsymbol{A}t}=\boldsymbol{I}+\boldsymbol{A}t+\frac{1}{2!}\boldsymbol{A}^2t^2+\cdots=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{k!}\boldsymbol{A}^k t^k$。它有如下性质：①对任意 n 阶方阵 $\boldsymbol{A}$，在任何有限闭区间上具有均匀收敛性。②如果 t' 和 s 为两个独立的自变量，则必有 $e^{\boldsymbol{A}(t'+s)}=e^{\boldsymbol{A}t'}e^{\boldsymbol{A}s}$。③$e^{\boldsymbol{A}t}$ 非奇异，它必有逆，为 $e^{-\boldsymbol{A}t}$。④如有 $n \times n$ 维矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$，且存在 $\boldsymbol{AB}=\boldsymbol{BA}$，则必有 $e^{(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})t}=e^{\boldsymbol{A}t}e^{\boldsymbol{B}t}$；如果 $\boldsymbol{AB} \neq \boldsymbol{BA}$，则 $e^{(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})t} \neq e^{\boldsymbol{A}t}e^{\boldsymbol{B}t}$。⑤$\frac{d}{dt}e^{\boldsymbol{A}t}=\boldsymbol{A}e^{\boldsymbol{A}t}=e^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{A}$。⑥对任何 t，均有 $|e^{\boldsymbol{A}t}|=e^{(\mathrm{tr}\boldsymbol{A})t}$，其中 $|e^{\boldsymbol{A}t}|$ 为 $e^{\boldsymbol{A}t}$ 的行列式，$\mathrm{tr}\boldsymbol{A}$ 为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的迹。⑦如果 $n \times n$ 维矩阵 $\boldsymbol{A}$ 有各不相同的特征值，令其为 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$，则 $e^{\boldsymbol{A}t}$ 必可经非奇异变换化为

$$\boldsymbol{P}^{-1}e^{\boldsymbol{A}t}\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} & & & \\ & e^{\lambda_2 t} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{\lambda_n t} \end{bmatrix}$$

⑧$e^{\boldsymbol{A}t}$ 的数学表达式可为 $\boldsymbol{A}$ 的有限项组合，即 $e^{\boldsymbol{A}t}=a_0(t)\boldsymbol{I}+a_1(t)\boldsymbol{A}+\cdots+a_{n-1}(t)\boldsymbol{A}^{n-1}$，式中 $a_0(t), a_1(t), \cdots, a_{n-1}(t)$ 为 t 的标量函数。

线性离散系统的状态转移矩阵　线性离散时变控制系统的齐次状态方程为 $\boldsymbol{x}(kT+T)=\boldsymbol{G}(kT)\boldsymbol{x}(kT)$，式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量，在满足解存在和唯一性条件时，在区间 $[hT, lT]$ 上任何时刻的 $\boldsymbol{x}(kT)=\boldsymbol{\Phi}(kT, hT)\times\boldsymbol{x}_0$，其中 $\boldsymbol{x}_0=\boldsymbol{x}(hT)$。$\boldsymbol{\Phi}(kT, hT)$ 为状态转移矩阵。

线性离散定常控制系统的齐次状态方程 $\boldsymbol{x}(kT+T)=\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}(kT)$，式中 $\boldsymbol{x}$ 为 n 维状态向量。在区间 $[hT, lT]$ 上任何时刻 $\boldsymbol{x}(kT)=\boldsymbol{G}^k\boldsymbol{x}_0$，其中 $\boldsymbol{x}_0=\boldsymbol{x}(hT)$；$\boldsymbol{G}^k$ 为状态转移矩阵。

zidong chaobiao jishu

自动抄表技术　（automatic meter reading technology）　以自动化手段替代传统人工抄取计量仪表（这里限于电能表）数据的技术。

在中国，随着用电管理自动化水平的提高，信息传输技术的日益进步和普及，多功能电能表的使用以及“一户一表”制的实施，传统的人工到装设电能表现场手工抄取用电数据的抄表方式日渐落后，并促使抄表技术迅速发展。多功能电能表除了具有多种计量电能的功能外，还具备集中式抄表的编程、负荷控制参数的分散采集、保存、测算数据的发送及接收等功能。实现这些功能的前提是多功能电能表装设有通信接口。多功能电能表内置有微处理器，可实现较复杂规约的通信，经通信接口可实现本地或远程的自动抄表。

实现本地自动抄表的方式有两种：一种是在装有红外线发射数据信息装置的电能表附近，使用装有自动抄表软件的便携式抄表微机，以非接触方式抄取用户的用电数据。另一种实现方式是利用本地总线将某一区域内电能表的数据送到抄表集中器，再利用便携式抄表微机或其他通信手段及工具将数据抄回。

远程自动抄表是一种不需要人员到达现场就能完成电能数据抄取的抄表方式。它或利用公共电话网络，或利用负荷

控制信道，或通过低压电力线载波建立通信联系，将电能表的数据自动传输到用电管理部门。远程自动抄表完全替代了人工抄表，大大提高了抄表的准确性、同时性和及时性，可杜绝抄表不到位、估抄、误抄、漏抄等，是电能计量、用电管理自动化的发展方向。

图 1 和图 2 是两种载波电能表。图 3 是远程电能表集中抄表系统。



图 1　预付费载波电能表



图 2　载波电能表



图 3　远程电能表集中抄表系统

zidong kongzhi lilun

自动控制理论

(automatic control theory)　关于自动控制系统的构成、分析和设计的理论，亦称控制理论。系统，是由按一定的关系作用和制约的各个部分组成的具有一定功能的整体，有一定的边界将系统内部与系统外部（系统环境）区分开来。如果系统的组成部分本身也是系统，则称其为原系统的子系统，而原系统又可以是更大系统的组成部分。这是系统概念的相对性或层次性。控制，是为了改善系统的性能或达到系统的目的，通过信息采集和加工而形成的施加在系统上的作用。自动控制系统，是代替或部分代替人的直接参与，使生产过程或其他过程按期望的规律或预定过程进行的控制系统。

见卷首电工技术基础——电力工业发展的基石中的“自动控制理论”部分。

参考书目

Katsuhiko Ogata. 现代控制工程. 5 版. 卢伯英等译. 北京：电子工业出版社，2011.

西格德·斯科格斯特德，伊恩·波斯尔思韦特. 多变量反馈控制（分析与设计）. 2 版. 韩崇昭等译. 西安：西安交通大学出版社，2011.

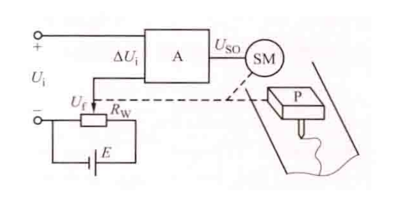
zidong pinghengshi jiluyi

自动平衡式记录仪

(self-balance records)　基准信号能自动跟踪被测信号变化的记录仪表。它是利用输入信号与基准信号间的差值调节基准信号值，使差值自动趋于零（达到平衡状态）。主要用于记录变化缓慢的被测对象。将两个独立的自动平衡式测量机构组合起来，可构成 x-y 记录仪。

组成　自动平衡式记录仪主要由四部分组成：测量线路、放大器、伺服电机和机械传动机构。①输入回路中的测量线路：由衰减器、滤波器、平衡电位器以及基准电压组成，主要作用是将被测信号与可变基准进行比较。②直流调制型放大器：由变流器（也称调制器或斩波器）、交流放大器、相敏检波解调器、直流放大器组成，用于放大直流缓变差值信号，使有足够的功率输出去驱动伺服电机。③伺服电机：是记录仪的执行机构，包括直流电机和同轴的测速发电机。④机械传动机构：包括匀速走纸和平衡电位器触头移动机构。

原理　测量线路由基准电压 U 和平衡电位器 R_W 组成（见图）。调节 R_W 可获得可变基准电压 U_f，被测信号 U_i 与 U_f 进行比较，差值 ΔU_i 经放大器 A 输出 U_{SO}；U_{SO} 控制伺服电机 SM，一方面带动记录笔 P 描绘曲线，另一方面拖动平衡电位器的可动触头，以调节基准电压 U_f。当 $U_f = U_i$ 时，$\Delta U_i = 0$，线路达到平衡，伺服电机停止转动，记录笔即停留在相应位置上。由于平衡时 U_f 与 U_i 大小相等，又与 R_W 上可动触头的位置相对应，而且记录笔与可动触头是连接在一起的，故记录笔的每一位置都反映被测信号 U_i 的大小，所记录的曲线便对应于 U_i 的连续变化过程。



自动平衡式记录仪

自动平衡式记录仪具有高输入阻抗（$3\times10^6\,\Omega$）、高灵敏度（2～5cm/mV）、低误差（1%～0.3%）等特点；受伺服电机的速度限制，动态性能较差，工作频率低于 1Hz，最高记录速度约 1m/s。此外，由于采用高增益放大器作比较器，微小的干扰信号就可能使放大器进入饱和状态，所以它对输入噪声的抗干扰能力较差。

zifa jihua

自发极化

(spontaneous polarization)　在没有外电场作用的情况下，某些晶体也产生极化的现象。凡在一定温度范围内具有自发极化现象，并且自发极化的方向能因外电场反向作用而反向的晶体称为铁电体。铁电体的自发极化并非整个晶体是同方向的。在没有外电场作用时，铁电体一般包含很多个称为电畴的小区域。由于偶极分子之间的相互作用很强，每个电畴中的分子偶极矩具有相同的方向，即产生自发极化。相邻电畴的自发极化方向相差 90°或 180°而相互抵消。因此，就整个铁电体而言，在无外电场作用时，宏观极化强度等于零，对外不呈现极化状态。在外电场作用下，电畴偶极矩将转向电场方向。交变电场下，铁电体的极化强度与电场强度的关系呈现出电滞回线。

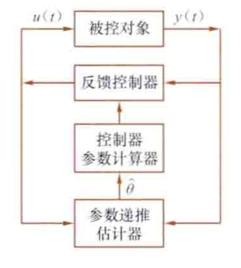
铁电体的自发极化与温度有密切的关系。在低温时，铁电体中偶极分子有序地排列而出现自发极化。随着温度的上升，热运动的无序作用使得自发极化减小。当温度高于某一临界温度时，自发极化的电畴急剧消失，电滞现象也随之消失，晶体从低温的铁电相转变为高温的顺电相。这是一个相

变的过程。临界温度 T_C 称为铁电体的居里点。

zijiaozheng shiying kongzhi xitong

自校正适应控制系统 （self tuning adaptive control system） 利用参数的递推估计与调节器或控制器参数的自动整定的适应控制系统。它可用于系统的结构已知、但参数未知的随机系统的控制。

自校正调节器 把递推最小二乘与最小方差控制器结合在一起，如图所示。它由参数递推估计器、控制器参数计算器和反馈控制器等三部分组成。参数递推估计器是根据对象的输入输出数据，估计被控对象的参数 θ，并将参数估计值 $\hat{\theta}$ 送到参数计算器进行控制器的参数计算，然后根据计算结果对控制器的参数进行校正，保证系统运行的性能指标达到最优或接近最优状态。



自校正适应控制系统

最小方差控制 设单输入单输出随机线性系统可表示为

$$A(z^{-1})y(k)=z^{-d}B(z^{-1})u(k)+C(z^{-1})e(k) \tag{1}$$

式中 $u(k)$，$y(k)$ 分别是被控对象的控制和输出序列；$e(k)$ 是环境干扰，它是零均值的白噪声序列；d 是输出对输入响应的滞后时间；z^{-1} 是后移算子。

$$\left.\begin{aligned}A(z^{-1})&=1+a_1z^{-1}+\cdots+a_nz^{-n}\\B(z^{-1})&=b_0+b_1z^{-1}+\cdots+b_nz^{-n}\\C(z^{-1})&=1+c_1z^{-1}+\cdots+c_nz^{-n}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

这里 n 是系统的阶次。

由式（1），可得

$$y(k)=\frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k)+\frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}e(k) \tag{3}$$

将式（3）中的 $C(z^{-1})/A(z^{-1})$ 分解成两部分，即

$$\frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}=F(z^{-1})+z^{-d}\frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})} \tag{4}$$

其中 F、G 分别是 $d-1$ 和 $n-1$ 次多项式，即

$$F(z^{-1})=1+f_1z^{-1}+\cdots+f_{d-1}z^{-d+1}$$

$$G(z^{-1})=g_0+g_1z^{-1}+\cdots+g_{n-1}z^{-n+1}$$

将式（4）代入式（3）中，等号两边分别乘以 z^{+d} 得

$$y(k+d)=\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k)+F(z^{-1})e(k+d)+\frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})}e(k) \tag{5}$$

最小方差控制器就是在随机干扰作用下以及输出与控制作用之间存在 d 步滞后的情况下，使实际输出 $y(k+d)$ 与要求的设定值 y_r 间的误差的方差为最小的控制器，用公式表示为

$$\mathrm{E}[y(k+d)-y_r]^2=\min \tag{6}$$

可以求得最小方差控制律为

$$u^*(k)=[C(z^{-1})y_r-G(z^{-1})y(k)]/[B(z^{-1})F(z^{-1})] \tag{7}$$

zong xiebo jibianlü

总谐波畸变率 （total harmonic distortion，THD）

非正弦周期性交变量的各次谐波含有率的平方和的平方根值，简称畸变率。它是非正弦周期性波形的一个重要数字特征量，用以衡量波形畸变的程度。许多国家规定，低压电力网供电电压的总谐波畸变率不得超过5%。通常认为符合这种标准的工业用电的电压波形是工业的正弦波形。

以电压畸变波形为例，其总谐波畸变率的定义是

$$\mathrm{THD}=\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}\left(100\frac{U_n}{U_1}\right)^2}\%$$

式中 U_n 为第 n 次谐波电压的有效值，$n\geqslant2$；U_1 为基波电压的方均根值，但也常用额定电压 U 代替 U_1。

zukang

阻抗 （impedance） 见相量法。

zukang fenxiyi

阻抗分析仪 （impedance analyzer） 测量电子与电工元器件或材料阻抗特性的仪器。实际应用场合，需要测量的有关阻抗的参数较多，包括复阻抗、复导纳、电阻、电容、电导、电纳、电感、品质因数、反射系数等。

阻抗分析仪的种类很多，包括电桥法阻抗分析仪、谐振法阻抗分析仪、I-U 法阻抗分析仪、射频 I-U 法阻抗分析仪、自动电桥法阻抗分析仪和LCR自动测试仪。应针对被测阻抗工作的频率范围、量值大小及测量准确度等要求，选用不同的阻抗分析仪。

电桥法阻抗分析仪 测量准确度较高，但单一电桥线路（见交流电桥）测量阻抗的频段较窄；配以不同的电桥线路，可提供较宽的阻抗频率测量范围（直流～300MHz）。要手动调节电桥平衡，复杂且耗时，故现在已很少使用。

谐振法阻抗分析仪 测量阻抗的频率范围为10kHz～70MHz，采用该法测量高品质因数即高Q值，且测量准确度高，但需调节谐振频率；且采用此法测量阻抗的准确度较低，故这种阻抗分析仪通常仅用于高Q值的测量，见图1。

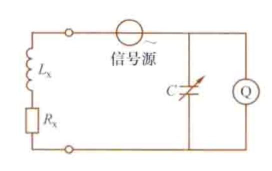


图1 谐振法阻抗分析仪原理测量电路

I-U 法阻抗分析仪 原理测量电路见图2。由电压表V1、V2的测得值可确定被测阻抗 $\underline{Z}_x$ 两端的电压值，由V2的测得值和取样电阻 R 的值可算出流过被测阻抗 $\underline{Z}_x$ 的电流，于是便可根据电流、电压求出被测阻抗 $\underline{Z}_x$。受测试电路中信号源变压器线性频率特性范围窄的限制，这种阻抗分析仪测量阻抗的频率范围比射频 I-U 法窄，且频率上限低，局限于10kHz～100MHz。

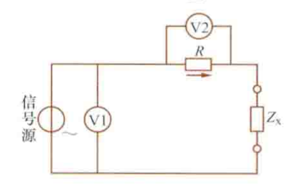


图2 I-U 法阻抗分析仪原理测量电路

射频 I-U 法阻抗分析仪 原理测量电路见图3。对图3（a），由电压表V1、V2的测得值可确定相应取样电阻 R_1、R_2 中流过的电流，进而可算出流过被测阻抗 $\underline{Z}_x$ 的电流，再由信号源电压和V2的测得值，算出被测阻抗 $\underline{Z}_x$ 两端的电压，于是便可根据电流、电压求出被测阻抗 $\underline{Z}_x$。对图3（b）所示测量电路，由电压表V1、V2的测得值可确定被测阻抗 $\underline{Z}_x$ 两端的电压量值，由电压表V2的测得值和取样电阻 $R/2$ 可算出流过被测阻抗 $\underline{Z}_x$ 的电流，于是可根据电流、电压求出被测阻抗 $\underline{Z}_x$。这种阻抗分析仪主要用于测量工作在射频

的元器件阻抗参数，适用频率范围为1MHz～3GHz，且测量准确度高。但受测试电路中信号源变压器线性特性频率范围窄的限制，上限频率难以提高。

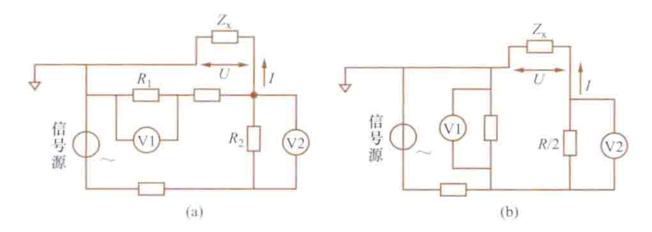


图3　射频I-U法阻抗分析仪原理测量电路
(a) 原理线路一；(b) 原理线路二

基于自动电桥法的阻抗分析仪　原理测量电路见图4。根据运算放大器的工作原理，L点的电位为地电位，运算放大器两输入端均不取电流，如此，由电压表V2的测得值和反馈电阻R可算出流过被测阻抗的电流，而电压表V1的测得值即为被测阻抗Z_x两端的电压。于是，由上述电流和电压便可算出被测阻抗。这种阻抗分析仪能在20Hz～110MHz频率范围内准确地测量宽范围（几毫欧姆～100MΩ）的阻抗值。低频段阻抗分析仪一般采用此原理构建。

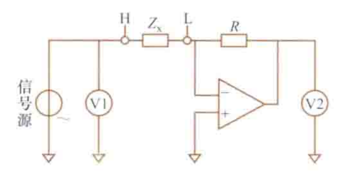


图4　基于自动平衡电桥法的阻抗分析仪原理测量电路

LCR自动测试仪　对工作在低频段阻抗的测量，现在较多采用LCR自动测试仪。它一般可测量电阻、电容、电感、电导、介质损耗因数、品质因数、阻抗、导纳、相角等参数，也能测量各种电介质以及磁性材料的有关参数。

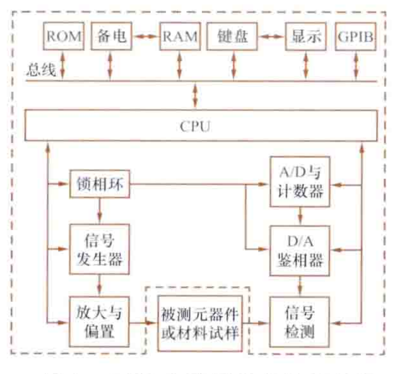


图5　LCR自动测试仪原理框图

早期的LCR自动测试仪多基于电桥法或谐振法构建。新型LCR自动测试仪多采用相量电压-电流测量法制成，可实现多频点、多参数测量，能自动切换量程，且可修正系统误差。

相量电压-电流测量法是根据被测元器件或材料试样的电压相量$\underline{U}_x$和电流相量$\underline{I}_x$按欧姆定律计算阻抗值$\underline{Z}=\underline{U}_x/\underline{I}_x$。由于$\underline{U}_x$和$\underline{I}_x$均无法直接测得，需分别测量它们的实部和虚部，进而再合成出它们，即$\underline{U}_x=a+\mathrm{j}b$；$\underline{I}_x=c+\mathrm{j}d$；$\underline{Z}_x=\underline{U}_x/\underline{I}_x=(a+\mathrm{j}b)/(c+\mathrm{j}d)$，利用计算机即可实现。图5是LCR自动测试仪的原理框图。

图5中，锁相环产生所需的各种时序信号，正弦信号发生器产生一定频率和幅值的测试信号，经放大和偏置电路施加到被测元器件或材料试样上。它们的输出信号经信号检测电路测量，通过D/A鉴相器得到电压、电流相量在各坐标轴（0°、90°、180°、270°）上的投影分量，然后由A/D转换器量化，最后由计算机处理并输出。

随着大规模集成电路和微处理器技术的不断发展，基于微处理器构建的阻抗分析仪日益普及，以宽频带、多功能、多参量、高准确度、高速度、自校准、自诊断、大屏幕、网络化等为特征的智能化阻抗参数分析仪已成为发展进步的主流。

zukang pipei

阻抗匹配　(impedance matching)　负载阻抗与电源内阻抗或传输线特性阻抗之间的特定配合关系。前一种特定配合关系称为负载与电源的阻抗匹配；后一种特定配合关系称为负载与传输线的阻抗匹配。

负载与电源的阻抗匹配　分共轭匹配和模匹配两种。为使可调负载从给定的电源中获取最大功率，负载阻抗$\underline{Z}=|\underline{Z}|\angle\varphi$与电源内阻抗$\underline{Z}_i=|\underline{Z}_i|\angle\varphi_i$间应该满足共轭匹配和模匹配特定配合关系。

共轭匹配：其特定配合关系为$\underline{Z}=\underline{Z}_i^*$（$\underline{Z}_i^*$是$\underline{Z}_i$的共轭复数），亦即$|\underline{Z}|=|\underline{Z}_i|$，$\varphi=-\varphi_i$。

模匹配：其特定配合关系为$|\underline{Z}|=|\underline{Z}_i|$。在模匹配下，负载获得的最大功率要比共轭匹配下的小。

负载与传输线的阻抗匹配　传输线终端处的负载阻抗与该传输线的特性阻抗彼此相等。这种情况下，在传输线终端处没有反射波，由电源端发出的入射波经传输线送至终端处的功率全部被负载所吸收。

zunixing dianrong fenyaqi

阻尼型电容分压器　(damped capacitor voltage divider)

见分压器。

zuran cailiao

阻燃材料　(flame resisting materials)　在热源和火源的外界环境中难燃或着火后能自熄的材料。在电气、电子工业中使用的绝缘材料和结构材料，往往在发热、高电压、放电等条件下工作，容易引起火灾，所以在矿山、轮船、高层建筑、石油化工、发电厂等场所，要求其中所用电气设备的绝缘材料是阻燃型的。

提高材料阻燃性的途径　①人工合成本身具有高耐热性和阻燃性的材料，如氟塑料、聚酰亚胺等。②加入无机或有机阻燃剂。无机阻燃剂中常用的有氢氧化铝、氢氧化镁和三氧化二锑等。在含卤有机阻燃剂中，溴类阻燃剂的使用在迅速增长，而氯类阻燃剂因其在燃烧过程中有毒性气体放出则逐年减少。无公害、低烟、无卤阻燃材料是社会发展对环境友好的要求，也是阻燃材料的发展方向。

材料阻燃性的评定　氧指数法是评价材料阻燃性的重要方法之一。氧指数是指在规定条件下，试样在氧和氮的混合气流中，维持稳定燃烧所需最低氧浓度，用混合气流中氧所占体积的百分数来表示。氧指数用来给材料的燃烧性分级。氧指数小于21者为可燃性材料；氧指数在21～27之间的称自熄性材料；氧指数大于27的为阻燃材料。

zuhe luoji

组合逻辑　(combinational logic)　输出仅与当时输入逻辑值有关的逻辑系统。具有这种逻辑关系的电路称为

组合逻辑电路，简称组合电路。组合电路的输出状态只决定于同一时刻各输入状态的组合，而与电路以前的状态无关。数字系统中的译码器、编码器、多路选择器和奇偶校验电路等都是组合电路。

图 1 是组合电路框图，其中，$x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为输入逻辑变量，$Z_1, Z_2, \cdots, Z_m$ 是逻辑输出，式 $Z_i = f_i(x_1, x_2, \cdots, x_n), i = 1, 2, \cdots, n$ 称为组合函数。

组合电路可看成由与门、或门、非门这三种最基本的逻辑门电路组合而成。与、或、非逻辑门电路对应于布尔代数中最基本的与、或、非三种逻辑运算。实现组合电路的途径是多种多样的，可采用基本门电路，也可采用中、大规模集成电路。组合电路的特点是：①输入、输出之间没有反馈延迟通道；②电路中无记忆单元。

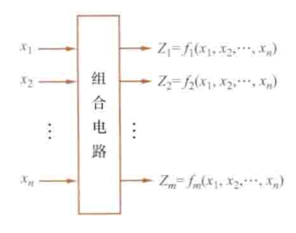
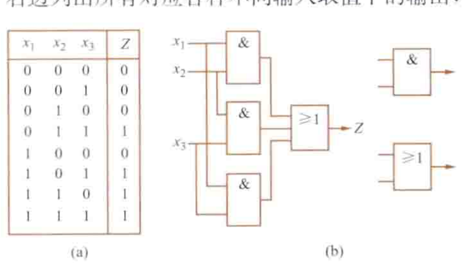


图 1　组合电路框图

一个特定的组合逻辑问题，可以通过多种不同的组合电路来实现。在实际设计工作中，如果由于某些原因无法获得某些门电路，可以通过等值演算得到等价的逻辑表达式，从而能使用其他器件来代替该器件。同时，为了使逻辑电路的设计更简洁，通过各种方法对逻辑表达式进行化简也是必要的。组合电路设计的一般步骤如下：①根据对问题的文字描述建立真值表；②由真值表列出组合函数；③对组合函数进行简化，使其项数最少或变量个数最少；④由简化后的组合函数按给定电路画出逻辑图。

真值表　用真假值（1，0）来表示输入逻辑变量与输出函数之间关系的表格。表的左边列出所有输入的全部可能取值，表的右边列出所有对应各种不同输入取值下的输出，见图 2（a）。



x_1	x_2	x_3	Z
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

图 2　组合逻辑电路
（a）真值表；（b）逻辑电路

设计组合电路的一个例子：设计一个三人表决电路（x_1, x_2, x_3），每人一个按键，如果同意则按下，不同意则不按；结果用指示灯表示，多数同意时指示灯亮，否则不亮。三个按键 x_1, x_2, x_3 按下时为"1"，不按时为"0"。输出量为 Z，多数赞成时是"1"，否则是"0"。它的真值表为图 2（a）。由此表可写出组合函数是：

$$Z = \bar{x}_1 x_2 x_3 + x_1 \bar{x}_2 x_3 + x_1 x_2 \bar{x}_3 + x_1 x_2 x_3$$

利用布尔代数进行简化，简化后的函数是 $Z = x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_1 x_3$。由简化函数式可画出图 2（b）所示的逻辑图。

对已存在的组合电路进行分析，用文字描述其逻辑功能，是上述设计步骤的逆过程。

zuhe luoji dianlu

组合逻辑电路　（combinational logic circuit）　任何时刻输出信号的逻辑状态仅取决于该时刻输入信号的逻辑状态，而与输入信号和输出信号过去状态无关的逻辑电路。（见组合逻辑）

由于组合逻辑电路的输出逻辑状态与电路的历史情况无关，所以它的电路中不包含记忆性电路或器件。门电路是组合逻辑电路的基本单元。

常用的组合逻辑电路都已制成标准化、系列化的中、大规模集成电路。

zuida xuliangbiao

最大需量表　（maximum demand meter）　指示各连续等时限内平均功率最大值的电能表。用于记录电力用户月消耗平均功率的最大值。

在感应系电能表计度器上增设最大需量指示器，其机构如图 1 所示。铝圆盘的转动经蜗杆 1、蜗轮 2 传至减速齿轮 4、5。在齿轮 5 的轴上固定有推进指针 3，其偏转角与铝圆盘转数成正比，可指示一定时限如 15min 内的平均功率值。推进指针一旦与需量指针 6 相碰便同时偏转。时限机构由同步电动机 7 经齿轮 8、9 及 10 减速。齿轮 10 的轴上固定有凸轮。每经一定时限，凸轮即推动连杆 11 一次（或将一对触点接通，使电磁铁动作，推动连杆 11 一次），于是齿轮 4 与 5 脱开，推进指针受螺旋弹簧 14 的作用返回零位，而需量指针通过摩擦片与刻度盘 13 接触，故停留不动。经 2～3s 凸轮旋离连杆（或触点断开），连杆受拉力弹簧 12 作用复位，齿轮 4、5 再行啮合，推进指针又开始偏转。当平均功率超过以往值时，需量指针再被推动向前偏转。如此往复进行。到一个月时，需量指针所指的刻度值，即为该月平均功率的最大值。记录后，用外壳上的拨杆将需量指针拨回零位，可重新记录下月的平均功率最大值。

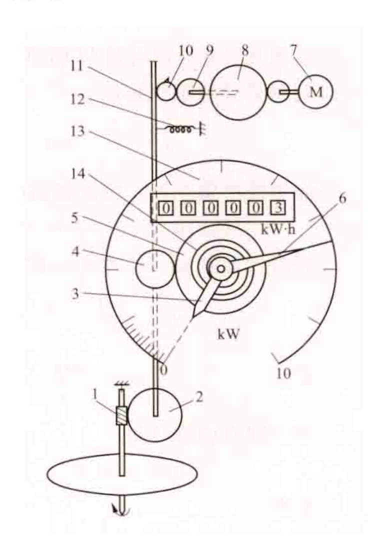


图 1　最大需量指示器机构图
1—蜗杆；2—蜗轮；3—推进指针；4、5—齿轮；6—需量指针；7—同步电动机；8、9、10—齿轮；11—连杆；12—拉力弹簧；13—刻度盘；14—螺旋弹簧

图 2 是最大需量电能表的外形图。



图 2　最大需量电能表

最大需量表的准确级别为 1 级和 2 级，其测量电能的原理和特性与电能表相同。最大需量指示误差一般为满刻度值的±2%。测量平均功率的额定时限一般为 15min 和 30min，也可设为其他。推进指针从开始上升到回至零位的时限误差小于额定时限的±1%。

多功能静止式电能表或智能电表大多具有最大需量测量

功能，传统的感应系电能表构成的最大需量表逐渐被淘汰。

zuiduan shijian kongzhi

最短时间控制 (minimum time control) 使系统以最短的时间从初始状态转移到预定的终端状态的控制，亦称最速控制或时间最优控制。

系统的状态方程为

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}t &= f(x,t) + Bu(t) \\ x(t_0) &= x_0, x(t_f) = x_f \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中 x 为 n 维状态向量；t_0 为初始时刻；t_f 为终端时刻。系统本身是非线性的（包括线性的），而 p 维控制向量 $u(t)$ 是以线性方式出现的，并受以下不等式约束

$$|u_j(t)| \leqslant M_j; j = 1,2,\cdots,p \tag{2}$$

这里 M_j 为给定向量 M 的第 j 个分量。

问题是寻找最优控制 $u^*(t)$ 使下列性能指标为最小

$$J = \int_{t_0}^{t_f} 1 \cdot \mathrm{d}t = t_f - t_0 \tag{3}$$

应用极小值原理，哈密顿函数为

$$H[x,u,\lambda,t] = 1 + \lambda^{\mathrm{T}} f(x,t) + \lambda^{\mathrm{T}} Bu \tag{4}$$

若最优控制 $u^*(t)$ 存在，则有

$$\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \dot{f}(x,t) + Bu \tag{5}$$

和

$$\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial f}{\partial x}\lambda \tag{6}$$

由于两点边值已知

$$x(t_0) = x_0, x(t_f) = x_f \tag{7}$$

并由

$$\begin{aligned} \min H[x^*,u,\lambda^*,t] &= \min_{u\in U}[1 + \lambda^{*\mathrm{T}} f(x^*,t) + \lambda^{*\mathrm{T}} Bu] \\ &= 1 + \lambda^{*\mathrm{T}} f(x^*,t) + \min_{u\in U}\lambda^{*\mathrm{T}} Bu \end{aligned} \tag{8}$$

可得，$u^*(t)$ 是由 $\min_{u\in U}\lambda^{*\mathrm{T}} Bu$ 决定的，即

$$u_j^*(t) = -M_j \cdot \mathrm{sgn}([B^{\mathrm{T}}\lambda^*]_j); j = 1,2,\cdots,p \tag{9}$$

式中 U 为容许控制的集合；sgn 表示符号函数。这表明，控制向量是在容许控制域的边界上取值。最小时间控制是“继电型”控制，即“开关型”控制，在英文文献中，称为 bangbang 控制，译作“砰砰”控制。它之所以能够快速响应，是由于它能以最大容许控制加速、以最小容许控制制动。

zuixiao ercheng guji

最小二乘估计 (least square estimation) 以残差的平方和最小为估计准则的数学估计方法。1795 年由 C. F. 高斯 (C. F. Gauss) 首先提出。它是参数估计中较成熟的基本方法，并获得广泛的应用。

线性差分方程模型的最小二乘估计 对一个单输入单输出的线性定常系统，可以用 n 阶常系数线性差分方程来表示

$$y(k) + \sum_{i=1}^{n} a_i y(k-i) = \sum_{i=0}^{n} b_i u(k-i) \tag{1}$$

式中 k 为离散时间，取整数；a_i，b_i 为常系数；n 为系统的阶次。

考虑到模型噪声和量测噪声 $e(k)$，式 (1) 可改写为

$$y(k) = -\sum_{i=1}^{n} a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^{n} b_i u(k-i) + e(k) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k) = [-y(k-1),\cdots,-y(k-n),u(k),\cdots,u(k-n)]$$

令

$$\boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}} = [a_1,\cdots,a_n,b_0,b_1,\cdots,b_n]$$

将式 (2) 改写为

$$y(k) = \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \tag{3}$$

将观测次数为 N 的数据代入，可以建立一组由 N 个方程构成的方程组，并写成矩阵向量形式

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X\theta} + \boldsymbol{e} \tag{4}$$

式中

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} y(n+1) \\ y(n+2) \\ \cdots \\ y(n+N) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{e} = \begin{bmatrix} e(n+1) \\ e(n+2) \\ \cdots \\ e(n+N) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n+1) \\ \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n+2) \\ \cdots \\ \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n+N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y(n) & \cdots & -y(1) & u(n+1) & \cdots & u(1) \\ -y(n+1) & \cdots & -y(2) & u(n+2) & \cdots & u(2) \\ \cdots & & & \cdots & & \\ -y(n+N-1) & \cdots & -y(N) & u(n+N) & \cdots & u(N) \end{bmatrix}$$

最小二乘估计，就是求得参数 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$，使下述性能指标 J 为最小

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=n+1}^{n+N} e^2(k) = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e} \\ &= (\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X\theta})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X\theta}) \end{aligned} \tag{5}$$

令

$$\left.\frac{\partial \boldsymbol{J}}{\partial \boldsymbol{\theta}}\right|_{\theta=\hat{\theta}} = 0$$

求得

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X} \tag{6}$$

这就是参数 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 的最小二乘估计。对 $\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}$ 为非奇异的输入信号，参数的最小二乘估计有解。

加权最小二乘估计 如果对式 (5) 中，每个估计残差 $e(k)$ 加不同的权，令 $\boldsymbol{W}$ 为加权矩阵，$\boldsymbol{W}$ 限制为正定对称矩阵，则可得加权最小二乘估计 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_W$ 的计算公式

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_W = (\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{WX})^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{WY} \tag{7}$$

zuixiao fangcha guji

最小方差估计 (minimum variance estimation) 以估计误差的方差阵最小为估计准则的数学估计方法。其前提是已知被估计的 n 维随机向量 $\boldsymbol{X}$ 和它的 q 维观测向量 $\boldsymbol{Y}$ 的联合概率密度 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$、$\boldsymbol{X}$ 的条件概率密度 $\boldsymbol{g}_1(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y})$ 和 $\boldsymbol{Y}$ 的概率密度 $\boldsymbol{f}_2(\boldsymbol{y})$。这种方法适用于随机向量为非正态分布的情况，且估计不必是观测的线性函数。

当 $\boldsymbol{y}$ 为随机向量 $\boldsymbol{Y}$ 的某一给定值时，$\boldsymbol{X}$ 的条件概率密度为 $\boldsymbol{g}_1(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y})$，则联合概率密度为

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \boldsymbol{g}_1(\boldsymbol{x}|\boldsymbol{y})\boldsymbol{f}_2(y) \tag{1}$$

估计误差的方差阵为

$$\begin{aligned} J &= \mathrm{E}[\tilde{\boldsymbol{X}}\tilde{\boldsymbol{X}}^{\mathrm{T}}] \\ &= \mathrm{E}\{[\boldsymbol{X} - \hat{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{Y})][\boldsymbol{X} - \hat{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{Y})]^{\mathrm{T}}\} \end{aligned} \tag{2}$$

使式 (2) 的 J 为最小，即得 $\boldsymbol{X}$ 的最小方差估计 $\hat{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{y})$

是 X 的条件数学期望

$$\hat{X}(y)=\int_{-\infty}^{\infty}xg_1(x\mid y)\mathrm{d}x=\mathrm{E}[X\mid Y=y] \quad (3)$$

一般可写成

$$\hat{X}(Y)=\mathrm{E}[X\mid Y] \quad (4)$$

最小方差估计实际上就是 $Y=y$ 时 X 的条件均值，故最小方差估计又称为条件均值估计。

考虑到式（4），最小的估计误差的方差阵为

$$\begin{aligned} J&=\mathrm{E}\{\widetilde{X}\widetilde{X}^{\mathrm{T}}\} \\ &=\mathrm{E}\{[X-\mathrm{E}(X\mid Y)][X-\mathrm{E}(X\mid Y)]^{\mathrm{T}}\} \end{aligned} \quad (5)$$

最小方差估计的一个重要性质是估计的无偏性。这是因为 $\mathrm{E}[\hat{X}(Y)]=\mathrm{E}[\mathrm{E}(X\mid Y)]=\mathrm{E}[X]$。

zuixiao xiangwei xitong

最小相位系统

（minimum phase system） 具有最小相位传递函数的线性定常系统。最小相位传递函数，是在右半 s 平面上没有开环极点和零点的传递函数。在右半 s 平面上有开环极点和（或）零点的传递函数称为非最小相位传递函数。具有非最小相位传递函数的系统则称为非最小相位系统。

在具有相同幅频特性的诸系统当中，最小相位系统的相角变化范围是最小的。

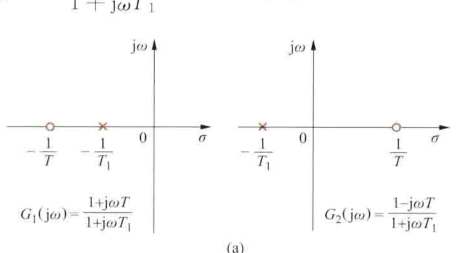
设有两个系统的正弦传递函数分别为

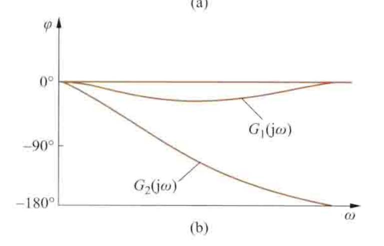
$$G_1(\mathrm{j}\omega)=\frac{1+\mathrm{j}\omega T}{1+\mathrm{j}\omega T_1}$$

$$G_2(\mathrm{j}\omega)=\frac{1-\mathrm{j}\omega T}{1+\mathrm{j}\omega T_1}(0<T<T_1)$$

图（a）是这两个系统的极点、零点分布图；图（b）所示为它们的相角特性。

非最小相位系统在高频段的相角滞后大，响应缓慢。在设计系统时，如果响应的快速性是主要的性能指标，就不应采用非最小相位系统。





最小相位系统 $G_1(s)$ 和非最小相位系统 $G_2(s)$ 的极点、零点分布图和相角特性

（a）极点、零点分布；（b）相角特性

zuiyou kongzhi

最优控制

（optimal control） 按照控制对象的动态特性，选择一个容许控制，使控制对象按技术要求运行，并使性能指标达到最优（极值）的控制。

系统的数学模型为如下的状态方程

$$\dot{x}(t)=f[x(t),u(t),t];\quad t\in[t_0,t_f] \quad (1)$$

式中 $x(t)$ 为 n 维状态向量；$u(t)$ 为 p 维控制向量。

在整个控制时间区间 $[t_0,t_f]$ 内满足约束条件的控制称为容许控制；在整个时间区间 $[t_0,t_f]$ 内满足状态变量约束的状态轨迹称为容许轨迹。

最优控制问题是寻找一容许控制 u^*，使系统 $\dot{x}(t)=f[x(t),u(t),t]$ 循一容许轨迹 x^* 运行，同时使性能指标

$$J=h[x(t_f),t_f]+\int_{t_0}^{t_f}g[x(t),u(t),t]\mathrm{d}t \quad (2)$$

为极小。式中 h 和 g 为标量函数；t_0 和 t_f 分别为起始时刻和终端时刻。t_f 可以是规定的或“自由的”，取决于问题的需要。

形如式（2）的性能指标，称为综合型或 Bolza 型。式（2）中只有第一项——终端性能指标，称为是终端型或 Mayer 型。式（2）中只有第二项——动态性能指标，称为是动态型或 Lagrange 型。引进适当的辅助变量，以上三种类型的性能指标可以互相转换。性能指标又称目标函数、性能泛函、价值函数、代价函数，等等。

性能指标是一个泛函。泛函是这样一类函数，其自变量本身也是函数。在式（2）中，泛函 J 的值决定于时间 t 的函数 $x(t)$，$u(t)$ 的值。最优控制问题按性能指标可大致分为最短时间控制、线性二次型最优控制、线性二次型次优控制，等等。

最优控制问题的求解，先是应用变分法。但古典变分法有很大局限性，它适用于控制向量不受限制的情况，而实际工程问题中更多遇到的是，这些变量受限制。极小值原理和动态规划的出现，为解决有约束的最优控制问题提供了有力的工具，从而大大推动了最优控制理论的发展。

最优控制在航天方面的应用很有成效。例如：①飞船的月球软着陆问题。飞船靠其发动机产生一推力，与月球重力方向相反，以控制飞船实现软着陆（落到月球上时速度为零）。问题要求选择一最优发动机推力程序，使燃料消耗最少。②航天拦截问题。发射火箭拦击敌方洲际导弹或其他航天武器，要求实现快速拦截，并尽可能节省燃料。③空对空导弹拦截问题。要求在某末态时刻尽可能接近目标，并尽可能节省能量。在电力系统领域，最优控制也有不少有成效的应用。

大　事　年　表

约公元前16～前11世纪
• 中国殷商甲骨文中出现“雷”字。

约公元前11世纪～前771年
• 中国西周青铜器番生簋铭文中出现“電”字。

约公元前585年
• 古希腊自然哲学家泰勒斯（Thales of Miletus）发现摩擦起电现象，将琥珀与毛皮摩擦后，琥珀会吸引羽毛类轻微物体。

公元前239年
• 中国战国时代吕不韦著《吕氏春秋》最早出现磁石引铁的记载“慈石召鐵，或引之也”，意思是磁石能吸铁，有吸引力：慈石即磁石，磁石与铁之间的吸引力有如慈母召唤儿子。

公元前1世纪
• 罗马哲学家卢克莱修（Titus Lucretius Carus）最先记载磁石的排斥作用和铁屑试验。

公元1世纪初
• 中国东汉王充著《论衡》中记载“顿牟掇芥，磁石引针”，最早把静电现象和静磁现象并列（顿牟即玳瑁，掇芥是指吸引芥子之类的轻小物体；磁由慈来，后演变为磁）。
• 中国东汉时期出现算盘。1953年，在中国山东发现的汉墓墓室内画像上有“算盘”：长方板有六个直行，内有圆珠，每行8颗，上5下3；画中的算盘引起英国汉学家李约瑟（Joseph T. M. Needham）的注意，作为推测性观点写入所著《中国科学技术史》中。
• 中国东汉时期建造的指南车被认为是最早的“控制”机械。

1086年
• 中国北宋沈括著《梦溪笔谈》中有“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。……”，最早记述了指南针的制法和用法。

约公元1100年
• 中国湖南重建岳阳慈氏塔，自塔顶有六条铁链下垂至塔基，以防雷击毁塔。

1119年
• 中国北宋朱彧著《萍洲可谈》中第一次明确记载了指南针应用于航海。

1269年
• 法国P. 佩雷格里尼（P. Peregrinus de Maricourt）在《论磁体的信》中指出磁有两极，异极相吸，同极相斥。

1600年
• 英国W. 吉尔伯特（W. Gilbert）发表《论磁体》，标志着磁学的诞生。
• 英国W. 吉尔伯特用称为Vorosium的装置来测磁。

1629年
• 意大利N. 科贝奥（N. Kobeo）发现同性电相斥现象。

1642年
• 法国B. 帕斯卡（B. Pascal）发明用齿轮运作的加法器，这是第一部机械加法器。

1644年
• 中国清初刘献廷在《广阳杂记》中记录了磁屏蔽现象：“磁石吸铁，隔碍潜通，或问余曰：‘磁石吸铁，何物可以隔之?’犹子阿儒曰：‘惟铁可以隔耳。’其人去復来，曰：‘试之果然。’余曰，此何必试，自然之理也。”

1663年
• 德国O. 冯．盖利克（O. von Guericke）制成第一个转动的大硫磺球摩擦起电机，并发现地磁场能使铁屑磁化。

1679年
• 德国G. 莱布尼兹（G. Leibniz）发表《论二进制数》（Explication de l'Arithmétique Binaire，1703年译为英文—Explanation of the binary arithmetic），提出二进制。

1688年
• 法国K. 戴马甘兰（K. Dai Ma Collard）在所著《中国新事》中记述了中国建筑物的防雷装置，在屋脊两端龙头的口中吐出伸向天空的金属舌头，舌根连接细铁丝直通地下；若雷电击中建筑物，电流就会从龙舌沿铁丝下行地底，避免雷电毁坏建筑物。

1694年
• 德国G. 莱布尼茨改良B. 帕斯卡的加法器，发明可作乘法的“步进乘法器”。

1705年
• 英国F. 豪克斯比（F. Hauksbee）制成第一台大功率静电起电机，并进行辉光放电实验。

1709年
• 英国F. 豪克斯比制成棉线验电器，是静电测量的最早探索者。

1720年
• 英国S. 格雷（S. Grey）发表《关于一些新电学实验的说明》，最先将静电学作为一门独立学科进行研究。

1729年
• 英国S. 格雷发现有些物体能导电，有些则不能，材料可区分为两类——导体和绝缘体。

1733年
• 法国C. F. 迪费（C. F. du Fay）发现摩擦玻璃棒和胶木棒时，二者所带电荷性质不同，他分别称之为“玻璃电”和“树脂电”，而且同性相斥，异性相吸；后来才采用现在的习惯叫法：“正电”和“负电”，或“阳电”和“阴电”。

1739年
• 英籍法裔J. T. 德萨居利埃（J. T. Desagu-

liers）将物质分为两大类，分别命名为非导体或电介质、导体或非电介质。

1745 年
- 荷兰 P. 范．穆申布鲁克（P. van Musschenbroek）和 A. 居奈于（A. Cunaeus），德国 E. G. 冯．克莱斯特（E. G. von Kleist）分别发明了最早的电容器——莱顿瓶。
- 德国 E. G. 冯．克莱斯特用酒精或水银储存电荷，当瓶内充电过量，金属杆上端产生光锥，这是最早的电晕放电试验。
- 居住在俄国的德国人 G. W. 里赫曼（G. W. Richmann 或 Г. В. Рихман）为研究大气电现象发明了静电计，这是第一台具有定量性质的电测量仪器。

1747 年
- 美国 B. 富兰克林（B. Franklin）发现尖端导体放电现象；同年还提出电荷守恒原理。

1748～1751 年
- 居住在俄国的德国人 G. W. 里赫曼发现静电感应现象。

1752 年
- 美国 B. 富兰克林进行了著名的电风筝实验，在雷电交加的天气里放飞带有莱顿瓶的风筝，从而获知云层中的电与摩擦所生的电荷，其性质完全相同。

1753 年
- 美国 B. 富兰克林发明避雷针。

1758 年
- 德国 F. U. T. 艾皮努斯（F. U. T. Aepinus）提出电荷守恒原理，并发现介质极化现象。

1759 年
- 英国西南部 Edystone 灯塔建立了避雷装置。

1767 年
- 英国 J. 普里斯特利（J. Priestleuy）发表《电学的历史和现状》，这是科学史中第一部电学史。

1772 年
- 英国 H. 卡文迪什（H. Cavendish）使用木心球电位计测量内球电位，得出电荷之间的作用力与距离的2±0.02 次方成反比。

1775 年
- 意大利 A. 伏打（A. G. A. A. Volta）发明静电起电盘。

1777 年
- 意大利 T. 卡瓦洛（T. Cavallo）发明卡瓦洛静电计，推进静电测量技术发生飞跃。

1778 年
- 意大利 A. 伏打论述了导体容纳电荷的能力，提出电容概念。

1780 年
- 意大利 L. 伽伐尼（L. Galvani）在解剖青蛙的过程中发现，当金属器械触及蛙体神经且附近又有雷电时，蛙腿肌肉发生剧烈收缩，人们称这一现象为伽伐尼效应。

1785 年
- 法国 C. A. 库仑（C. A. de Coulomb）进行了静电扭秤实验，建立了静电作用力的平方反比定律，即今所称的库仑定律；后来他又将这一定律应用到磁极间的作用力。
- 法国 C. A. 库仑根据力学原理，提出利用磁针在磁场中自由振荡的周期来测量地磁场的方法。

1786 年
- 英国 A. 贝内特（A. Bennett）提出金叶静电计的结构。

1788 年
- 英国 J. 瓦特（J. Watt）发明蒸汽机用的离心式飞摆调速器，是近代第一台自动控制装置。

1799 年
- 意大利 A. 伏打公布，他发现了电池原理，用圆铜板、锌板和介于其间的浸稀硫酸绒布片组成单元电池，再将多个单元电池叠置以提高电压，制成最早的能获得连续电流的伏打电堆。

1802 年
- 俄国 V. V. 彼得罗夫（V. V. Петров）用伏打电堆研究放电现象，他使用多达 2100 单元的电堆，发现了电弧放电现象。

1803 年
- 德国 J. W. 里特尔（J. W. Ritter）制成一台蓄电池。

1809～1811 年
- 英国 H. 戴维（H. Davy）制成一台 2000 副锌－铜对大电池，用来产生连续电弧，开创了电光源的时代。

1813 年
- 德国 C. F. 高斯（C. F. Gauss）提出的散度定理被应用于静电场，得到静电场的高斯定律。

1820 年
- 丹麦 H. C. 奥斯特（H. C. Oersted）发现电流的磁效应，电流流过导线时能使磁化的罗盘针偏转。
- 法国 A. M. 安培（A. M. Ampère）提出分子电流假说，用以说明磁的本质，认为所有电磁作用都是电流与电流的作用，他称这种作用力为电动力。
- 法国 J. B. 毕奥（J. B. Biot）和 F. 萨伐尔（F. Savart）通过实验得到了通电长直导线外的磁场规律，进一步由法国 P. S. 拉普拉斯（P. S. Laplace）从数学上得到了小电流段的磁场计算式，后称毕奥－萨伐尔定律。
- 德国 J. S. C. 施魏格尔（J. S. C. Schweiger）和 J. C. 波根多尔夫（J. C. Poggendorff）在多匝螺管线圈中放置磁针，制成最早的电流检测装置，称为伽伐尼电流倍增器。
- 法国 D. F. J. 阿拉戈发现电流通过线圈时，能使线圈中的铁块磁化，发明了电磁铁。
- 法国 C. X. T. 德．科马（C. X. T. de Colmar）采用 G. 莱布尼茨原理，制成可以进行加、减、乘、除四则运算的机械计算器。

1821 年
- 英国 M. 法拉第（M. Faraday）演示了通电流的导线使磁铁旋转的现象，这种

电磁旋转实验装置预示了以后电动机的出现。

- 德国 T.J. 塞贝克（T.J. Seebeck）发现两种不同导体组成的闭合回路中的温差电现象，称为塞贝克效应。
- 法国 A.M. 安培在 1821～1825 年间提出电流元概念，推导出电动力公式，得出安培环路定律。
- 法国 D.F.J. 阿拉戈（D.F.J. Arago）和德国 A. 冯．洪堡（A. von Humboldt），在测量地磁强度时偶然发现，金属可阻尼磁针的振荡。

1826 年

- 德国 G.S. 欧姆（G.S. Ohm）对各种金属导体进行大量实验后提出电阻概念，发表了电路的实验定律——欧姆定律。
- 德国 G.S. 欧姆制成用于测量小电流的悬丝式检流计。

1828 年

- 美国 J. 亨利（J. Henry）用纱包线绕制线圈，纱包线是最早出现的绝缘导线。

1829 年

- 美国 J. 亨利发现长导体或螺线管的一端从电池上断开时，断裂处会出现电火花，1832 年被确认为自感现象。

1831 年

- 英国 M. 法拉第发表了电磁感应定律，并制作了第一台发电机模型；几个月后，意大利 S.D. 内格罗（S. Dal Negro）制成往复式发电机模型。

1831～1835 年

- 英国 M. 法拉第在研究低气压放电时发现辉光放电现象和法拉第暗区。

1832 年

- 美国 J. 亨利提出了表征线圈自感应作用的自感系数。
- 法国 A.H. 皮克西（A.H. Pixii）演示了一台永久磁铁型旋转式手摇交流发电机。
- 英国 W. 斯特金（W. Sturgeon）发明换向器，并制成直流电动机。

1833 年

- 英国 S.H. 克里斯泰（S.H. Christie）发明四臂桥式电路。
- 法国 M.H. 皮克西（M.H. Pixii）在 A.H. 皮克西的交流发电机上安装换向器，制成一台旋转式手摇直流发电机。
- 英国 M. 法拉第发现 Ag_2S 具有负电阻温度系数，其电阻随着温度上升而下降，是负温敏电阻材料。

1834 年

- 俄籍爱沙尼亚裔 Э.Х. 楞次（Э.Х. Ленц）提出感应电流方向的楞次定律，指出感应电动势的方向是企图产生一个电流，以阻碍原来磁通量的变化。
- 英国 M. 法拉第发表了电解定律：电解中析出物质的量与所通过的电量成正比，也与析出物质的化学当量成正比。
- 美国 T. 达文波特（T. Davenport）将电磁铁的直线运动变为旋转运动，制成旋转直流电动机。
- 英国 W.S. 哈里斯（W.S. Harris）提出吸引式静电电表的测量机构。

1836 年

- 英国 J.F. 丹尼尔（J.F. Daniell）基于伏打电堆原理发明了世界上第一个实用电池——丹尼尔电池。
- 英国 W. 斯特金制成第一台悬圈电流计。

1838 年

- 俄籍德裔 M.H. 冯．雅可比（M.H. von Jacobi）制成实用的直流电动机，用它试作船舶的电力拖动。

1839 年

- 德国 C.F. 高斯从库仑定律出发定义了电荷量度，制定磁矩的第一个绝对量度，以及地球的磁场强度的量度，并创建第一个合理的电磁单位制。

1840 年

- 英国 J.P. 焦耳（J.P. Joule）对电流经过导线电阻产生的热进行了实验测定，发现这一热量正比于电阻与电流平方的乘积，提出电流热效应的焦耳定律。
- 英国 W.R. 格罗夫（W.R. Grove）制成铂丝灯。

1841 年

- 德国 W.E. 韦伯（W.E. Weber）制成测功计，用以测量强电流。
- 德国 J.C. 波根多尔夫提出了两种用于比较电位差或电阻的标准电路，即构成电位差计的定电流电路和定电阻电路。

1843 年

- 英国 C. 惠斯登（C. Wheatstone）基于四臂桥式电路，完成了直流单比电桥（又称惠斯登电桥）的实用化设计；随后他又做了改进，以利于惠斯登电桥推广应用。
- 德国 W.E. 韦伯和 E.W. 冯．西门子（E.W. von Siemens）提出了电动系电测量仪表的测量机构。

1844 年

- 法国 J.B.L. 傅科（J.B.L. Foucault）制成用木炭作电极的弧光灯，可用于短时照明。

1845 年

- 德国 G.R. 基尔霍夫（G.R. Kirchhoff）提出基尔霍夫定律，包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。
- 英国 M. 法拉第发现平面偏振光通过磁化介质时偏振面产生旋转的现象，称为法拉第效应。

1847 年

- 德国 H.L.F. 冯．亥姆霍兹（H.L.F. von Helmholtz）出版专著《论力的守恒》，用数学公式总结了能量守恒定律，建立了引力场、静电场、恒定磁场的能量的数学表达式，第一次详细而清晰地阐述了能量守恒定律，使原本有争议的这一原理被广泛接受。
- 英国 G. 布尔（G. Boole）在所著《逻辑的数学分析》和随后的《思维规律的

研究》中建立了"布尔代数"原型，创造了一套符号系统来表示逻辑中的各种概念，将形式逻辑归结为一种代数演算。

- 德国 G.R. 基尔霍夫首次用"树"的概念列出电路方程，为电网络的拓扑分析奠定基础。

1850 年
- 英国 M. 法拉第提出电磁场概念。

1851 年
- 德国 W.J. 辛斯特登（W.J. Sinsteden）提出用通电流的线圈代替永久磁铁，这是电机励磁方式的第一次改进。
- 美国传教士、西医士 D.J. 玛高温（D.J. MacGowan）在中国宁波译述了中国第一本中文电磁学著作《博物通书》，汉语词"电气"就源于该书。
- 德国 H.D. 伦可夫（H.D. Ruhmkorff）发明伦可夫感应圈，这种感应圈为后来阴极射线的发现和变压器的发明提供了技术基础。

1852 年
- 英国 J.P. 焦耳和 W. 汤姆逊（W. Thomson，后受封开尔文勋爵）发现焦耳-汤姆逊效应。

1853 年
- 英国 W. 汤姆逊采用电阻、电感和电容的电路模型，给出电路振荡方程，并导出振荡频率，这是电振荡理论的开端。

1854 年
- 英国 W. 汤姆逊研究了电信号在导线中的传播问题，系统分析了信号经海底电缆传送时衰减的原因。

1856 年
- 德国 E.W. 冯．西门子发明纵向横梭绕式电磁铁定子发电机，是现代交流发电机的前身。
- 英国 W. 汤姆逊发现金属的电阻应变效应：金属导体受力引起机械变形（拉伸或压缩）时，它的电阻值随之发生变化。

1858 年
- 德国 J. 普吕克尔（J. Plücker）利用低压（0.1333Pa）气体放电管研究辉光放电时，发现了阴极射线及其在磁场中的弯曲现象，成为 19 世纪末粒子辐射和原子物理研究的先驱。
- 德国 H. 盖斯勒（H. Geissler）发明低压放电管——盖斯勒管。

1859 年
- 法国 R.L.G. 普朗特（R.L.G. Plante）制成一种铅酸蓄电池。
- 意大利 A. 帕奇诺蒂（A. Pacinotti）发明环形电枢，制成电动机，构成了现代电动机原型。

1860 年
- 英国 J.W. 斯旺（J.W. Swan）在抽出空气的玻璃泡内装上炭化纸丝，发明了原始的电灯。

1861 年
- 英国 J.G. 麦克斯韦（J.G. Maxwell）在《论物理力线》中提出位移电流概念。

1862 年
- 英国 W. 汤姆逊使用单比电桥测量小电阻时，发现引线电阻和连接点处接触电阻会引起较大测量误差，因此提出了双比电桥电路，或称汤姆逊电桥；后他晋封为开尔文勋爵，又改称开尔文电桥。

1864 年
- 英国 J.G. 麦克斯韦提出电磁场基本方程式——麦克斯韦方程组，预言了电磁波的存在，指出了电磁波与光波的同一性。

1868 年
- 英国 J.C. 麦克斯韦发表《论调速器》，用微分方程构建了系统的数学模型，提出反馈控制概念。

1870 年
- 比利时发明家 Z. 格拉姆（Z. Gramme）制成第一台实用的直流发电机。

1873 年
- 英国 J.G. 麦克斯韦在系统总结电磁场理论的基础上，出版专著《电学和磁学论》。

1875 年
- 英国 J. 克尔（J. Kerr）发现各向同性的透明介质置于强电场中产生双折射的电光效应。
- 英国 E.J. 劳斯（E.J. Routh），20 年后德国 A. 赫尔维茨（A. Hurwitz）各自独立建立了根据代数方程系数直接判别系统稳定性的判据，后称劳斯一赫尔维茨判据。

1876 年
- 英国 O. 亥维赛（O. Heaviside）提出传输线理论——电报方程。
- 俄国 П.Н. 雅布洛奇科夫（П.Н. Яблочков）采用有两个绕组的感应线圈，第一个线圈连接到交流发电机，第二个线圈的输出为照明供电。
- 俄国 И.А. 维什涅格拉茨基（И.А. Вышнеградский）发表《论调节器的一般理论》，进一步总结了调节器的理论。

1878 年
- 英国 J.W. 斯旺展出一盏真空下用碳丝通电发光的白炽灯。

1879 年
- 英国 W. 克鲁克斯（W. Crookes）发现被视为物质第四态的等离子体。
- 美国 E.H. 霍耳（E.H. Hall）发现当电流垂直于外磁场通过导体时，在导体平行于磁场和电流方向的两个端面之间会出现电势差的现象，称为霍耳效应。
- 美国 T.A. 爱迪生（T.A. Edison）制成有实用价值的白炽灯。
- 英国 W.E. 艾尔顿（W.E. Ayrton）和 J. 佩里（J. Perry）制成可直接读数的动铁式便携电流表。
- 德国 R. 克劳修斯（R. Clausius）根据意大利 O.F. 莫索提（O.F. Mossotti）1850 年提出的模型，给出表达线性电介质相

对电容率与分子极化率之间的关系，称克劳修斯—莫索提方程。

1880 年
- 法国 J. 居里（J. Curie）和 P. 居里（P. Curie）在研究 α—石英晶体时，发现了压电现象。
- 美国 T. A. 爱迪生利用电解原理制成了直流电能表。
- 英国 W. 德拉路（W. de la Rue）和 H. W. 米勒（H. W. Muller）通过实验研究得到空气压力影响放电电压的曲线。
- 英国 W. O. 卡伦德（W. O. Callender）制成沥青浸渍纸绝缘电力电缆。

1881 年
- 美籍塞尔维亚裔 N. 特斯拉（N. Tesla）发现旋转磁场原理。
- 德国 E. 瓦堡（E. Warburg）发表铁的磁滞回线的实验观测结果，这是最早对磁滞现象的定量化研究。
- 英国 R. E. 克兰姆顿（R. E. Crompton）和 G. 凯普（G. Kapp）制成直接吸入式电流表。
- 英国 W. E. 艾尔顿和 J. 佩里利用电动系测量机构制成功率表。

1882 年
- 法国 J. A. 达松伐尔（J. A. D'arsonval）制成动圈式和镜式检流计。
- 美国 E. 汤姆逊（E. Thomson）制成电磁式电能表。

1883 年
- 美国 T. A. 爱迪生发现热电发射效应，称为爱迪生效应。
- 法国 L. C. 戴维南（L. C. Thevenin）提出电网络的戴维南定理，1853 年德国 H. L. F. 亥姆霍兹也曾提出过，故又称亥姆霍兹–戴维南定理。
- 美籍塞尔维亚裔 N. 特斯拉制成第一台感应电动机。
- 法国 L. 高兰德（L. Gauland）和英国 J. D. 吉布斯（J. D. Gibbs）制成铁芯开路的变压器（当时称为“二次发电机”）。

1884 年
- 英国 J. H. 坡印廷（J. H. Poynting）提出电磁场中能量传播的坡印廷定理。
- 英国 S. Z. 费兰梯（S. Z. Ferranti）制成单相交流发电机。
- 匈牙利 K. 齐伯诺夫斯基（K. Zipernowsky）、O. 布勒泰（O. Bláthy）、M. 德里（M. Deri）发明具有实用意义的铁芯闭合的心式和壳式变压器；次年使用“变压器”替代“感应线圈”和“二次发电机”等术语。

1885 年
- 意大利 G. 费拉里斯（G. Ferraris）提出电机中的旋转磁场理论，并制成两相交流电动机的实验室模型。
- 英国 O. 亥维赛预言了固体中存在永久静电效应，并将这种物体命名为 electret（取 electric 的‘electr’和 magnet 的‘et’组合而成），中译名驻极体。
- 英国 W. 汤姆逊制成静电电压表。
- 英国费兰梯工厂研制成世界第一台用油作灭弧介质的罐式断路器。

1887 年
- 德国 H. R. 赫兹（H. R. Hertz，1857—1894）发现电火花的光电离作用。

1888 年
- 德国 H. R. 赫兹实验产生了电磁波，并测量了波长和速度，证明了电磁波的存在。
- 意大利 G. 费拉里斯将旋转磁场用于交流电能测量。
- 美国 E. 韦斯顿（E. Weston）制作出外磁动圈式磁电系电测量仪表。
- 美籍塞尔维亚裔 N. 特斯拉发表《交流电动机和变压器的新系统》，系统论述了交流电的产生和使用。

1889 年
- 俄国 M. O. 多利沃–多布罗沃利斯基（М. О. Доливо—Добровольский）制成实用的三相交流单鼠笼异步电动机，并发明双鼠笼异步电动机；同年，制成三相变压器。
- 德国 F. 巴申（F. Paschen）在平行板电极间进行实验，完善了空气压力对放电电压的影响曲线，得出巴申定律。
- 匈牙利 O. 布勒泰制成单磁通式感应系电能表。
- 美国 H. 何乐礼（H. Hollerith）制成电动制表机，用以储存计算资料。

1891 年
- 爱尔兰 G. T. 斯坦尼（G. T. Stoney）使用 electron 来表示电的自然单位，electron 是 electric 中‘electr’和 ion 中‘on’的组合。
- 美籍德裔 C. P. 施泰因梅茨（C. P. Steinmetz）发现磁滞损耗与磁通密度的 1.6 次方成比例的经验关系，称施泰因梅茨定律。
- 美籍塞尔维亚裔 N. 特斯拉发明特斯拉变压器，又称特斯拉线圈。
- 法国 A. E. 布朗迪（A. E. Blondel）制成振子；基于它，1897 年制成电机械示波器，稍晚又研制出振动检流计。
- A. 弗兰克（A. Franke）制成双发电机式交流电位差计。

1892 年
- 英国 O. 亥维赛发明运算微积方法，将“微分算子”引入动态电路计算。
- 俄国 A. M. 李雅普诺夫（A. M. Ляпунов）出版博士论文《运动稳定性的一般问题》，为运动稳定性理论奠定了基础。

1893 年
- 美籍印度裔 A. E. 肯涅利（A. E. Ken-

nelly）提出，如果交流电采用正弦波就可以引入阻抗概念，和直流电路一样利用欧姆定律计算交流电路。
- 美籍德裔 C. P. 施泰因梅茨提出分析交流电路的复数符号法（相量法），采用复数表示正弦式的交流电，正弦量的加、减、导数、积分等运算转换为相应相量的代数运算，简化了交流电路的计算。
- 法国 A. E. 布隆代尔制成光线示波器。
- 美国诺威奇电缆公司制成油浸纸带绝缘结构的电缆。

1894 年
- 德国 W. 沃伊特（W. Voigt），推论出在自然界 32 种不同晶体点群中，只有无对称中心的 20 种点群的晶体才可能具有压电效应，获得了产生压电性的晶体内部结构点群的关系。

1895 年
- 感应系电能表改由永久磁铁产生反作用力矩，计数机构原用的铜制圆转盘被铝圆盘取代，感应系电能表的制造理论和工艺基本形成。
- 英国 R. E. 克兰姆顿制成单挡结合滑线电阻的电位差计。
- 德国 W. K. 伦琴（W. K. Röntgen）发现 X 射线。

1897 年
- 英国 J. J. 汤姆逊等发现阴极射线由比普通分子小得多的带负电载荷子组成，载荷子所带电量与氢离子的带电量相同。
- 美国 R. W. 伍德（R. W. Wood）首先对真空击穿开展研究。

1898 年
- 美国 E. L. 诺顿（E. L. Norton）提出电网络的诺顿定理。

1899 年
- 英国 J. J. 汤姆逊使用 electron（G. T. 斯坦尼的电的自然单位）来称呼阴极射线中带负电的载荷子；electron 中译为电子；词尾 ‘on’ 现已用于命名其他比原子小的质点，例如 proton—质子和 neutron—中子。
- 英国 J. J. 汤姆逊用磁场截止法测荷电粒子的荷质比，揭示出形成爱迪生效应的荷电粒子是电子，爱迪生效应是一种热电子发射现象。

1900 年
- 德国 J. 爱泼斯坦（J. Epstein）发明用于测量磁性材料特性的爱泼斯坦方圈。

1901 年
- 法国 H. 莫瓦桑（H. Moissan）和 P. 莱博（P. Lebeau）合成出六氟化硫气体，后广泛应用于电气设备的绝缘和灭弧。
- 美国 P. C. 休伊特（P. C. Hewitt）制成低压汞蒸气灯。

1902 年
- 英国 H. 阿吉顿（H. Ayrton）得到电弧静伏安特性。

1903 年
- 英国 J. S. 汤森（J. S. Townsend）提出汤森气体放电理论。

1904 年
- 英国 J. A. 弗莱明（J. A. Fleming）基于爱迪生效应发明了真空二极管。

1906 年
- 英国 R. 哈德菲尔德（R. A. Hadfield）开发出电机变压器铁芯用的硅钢片。
- 美国 L. 德．福雷斯特（L. de Forest）发明具有放大能力的真空三极管，是世界上第一个电子信号放大器件，从此出现了含电子管组成的第一代电子电路。
- 俄国 A. A. 马尔科夫（A. A. Ма́рков）提出马尔科夫链，这是一门随机过程理论，也是在逻辑层次研究离散事件系统（DEDS）较为常见的一种方法。
- 美国李兹和诺斯罗普（Leeds and Northrup）工厂在电位差计中加入标准电池度盘，使电位差计的构成更为完善。

1907 年
- 法国 P. 外斯（P. Weiss）提出铁磁性的原子理论。

1908 年
- 英国 A. 坎贝尔（A. Campbell）提出一种带互感的交流电桥电路。

1909 年
- 英国 C. V. 德赖斯达利（C. V. Drysdale）采用移相器制成极坐标式电位差计。

1910 年
- 美国 W. D. 库利奇（W. D. Coolidge）开发出钨丝拉丝工艺，1912 年制成钨丝灯泡。
- 英国 A. 坎贝尔和 A. 拉尔逊（A. Larsen）制成直角坐标式电位差计。

1911 年
- 英国 O. 亥维赛提出运算阻抗概念和求解电路暂态过程的运算法。
- 荷兰 H. K. 昂尼斯（H. K. Onnes）用液氦冷却汞时发现汞的超导电性，在 4.2K 的极低温度下，汞样品的电阻在极小温度范围内急剧下降到零。

1912 年
- 美国 I. 兰米尔（I. Langmuir）和 H. 阿诺德（H. Arnold）制成高真空电子管，使真空三极管的性能更稳定。

1913 年
- 德国 M. 霍赫施泰特（M. Hoechstadter）提出改善电缆内部电场分布的屏蔽型电缆结构，制成油浸纸绝缘分相屏蔽电缆。

1915 年
- 德国 W. 肖特基（W. Schottky）进一步改进了真空三极管，制成帘栅极电子管。

1917 年
- 意大利 L. 埃马努埃利（L. Emanueli）发明充油电缆。

1918 年
- 美国 C. L. 福台克（C. L. Fortescue）提出对称分量法，可将三相电路的不对称问题化为对称问题。

1920 年
- 印度 M. 萨哈（M. Saha）推导出电弧放电的萨哈方程。

- 德国H. 西林（H. Schering）发明具有两个高压桥臂和两个低压桥臂的西林电桥，可测量电介质材料的介质损耗因数和电容。
- 美国E. H. 阿姆斯特朗（E. H. Armstrong）设计出超外差电路，可构成结构简单、稳定性好、灵敏度高的调谐接收器。
- 瑞士H. 格莱纳赫（H. Greinacher）提出产生直流高电压的串级电路，1932年英国J. D. 考克饶夫（J. D. Cockcroft）和爱尔兰E. T. S. 华尔顿（E. T. S. Walton）进行改进，并用于产生高速正离子。
- 美国J. 瓦拉塞克（J. Valasek）发现在外电场作用下，罗息盐（酒石酸钾钠，$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$）的极化强度表现出非线性电滞回线行为，被称为铁电性。

1921年

- 美国芝加哥电力网通过电话线实现遥测系统监控功率分配，这是世界上最早的遥测系统。

1922年

- 美籍俄裔H. 米诺尔斯基（H. Минорский或N. Minorsky）对位置控制系统进行了分析，并对PID三作用给出了计算公式。
- 美国H. B. 伯劳克斯（H. B. Brooks）和F. C. 霍尔兹（F. C. Holtz）制成双级电流互感器，准确度比电磁式电流互感器明显提高；1940年出现商业化产品，准确度达到0.01级。
- 日本江口元太郎制成第一个驻极体：将融熔态的蜡和松香混合物在电场中固化后再除去电场，混合物固体会长期保持极化状态。

1923年

- 德国人E. 马克斯（E. Marx）提出产生较高冲击电压的多级回路，由此出现马克斯发生器。
- 美籍俄裔B. K. 兹沃里金（B. K. Зворыкин或V. Zworykin）获得光电摄像管的专利权，早期电视摄像机所用的就是这种摄像管。

1924年

- 美国R. M. 福斯特（R. M. Foster）提出二端网络的电抗定理。

1925年

- 美国H. A. 惠勒（H. A. Wheeler）设计出自动音量控制电路。
- 美国J. E. 理林菲德（J. E. Lilienfeld）于1925年，O. 海尔（O. Heil）于1934年分别提出场效应管模型，但实用器件到1952年才制造出来。

1927年

- 美国H. S. 布莱克（H. S. Black）发明负反馈放大器；随后，美国H. 奈奎斯特（H. Nyquist）提出奈奎斯特图，根据此图可设计出稳定的负反馈放大电路。

1928年

- 英国A. D. 布卢姆莱因（A. D. Blumlein）提出感应耦合比例臂电桥电路。

1929年

- 美籍荷兰裔P. 德拜（P. Debye）提出极性分子理论，确定了分子偶极矩的测定方法，以后人们把偶极矩的单位定为德拜（D）。
- 美国F. W. 皮克（F. W. Peek）通过实验观察，提出导线表面空气发生电晕的起始电场强度公式。

1930年

- 美国V. 布什（V. Bush）制成世界上首台模拟电子计算机。

1931年

- 英国A. H. 威尔逊（A. H. Wilson）提出固体半导体的量子力学模型。
- 美国R. J. 范德格拉夫（R. J. van de Graaff）发明静电加速器。
- 美国C. E. 本勒（C. E. Berner）制成油压电缆。

1932年

- 美国H. 奈奎斯特建立了根据频率响应判别系统稳定性的判据。

1933年

- 德国W. 迈斯纳（W. Meissner）和R. 奥克森菲尔特（R. Ochsenfeld）发现了超导体具有完全抗磁性，它在外磁场中只有极小的磁场穿透深度，称为迈斯纳效应，为伦敦方程的提出奠定了基础。

20世纪30年代

- 出现利用磁性材料自身饱和特性制成的磁通门计，广泛应用于弱磁场测量。

1934年

- 美国H. L. 哈森（H. L. Hazen）给出伺服机构的理论研究成果。

1935年

- 英籍德裔F. 伦敦（F. London）和H. 伦敦（H. London）提出伦敦方程，在经典电动力学范围内建立了第一个比较完整的超导理论，成功解释了超导体一系列奇特的电磁性质。
- 德国通用电气公司（AEG）首先制成自由喷射式空气断路器。

1936年

- 美国C. E. 香农（C. E. Shannon）提出基于布尔代数设计组合电路的方法，布尔代数成为开关理论和数字逻辑设计的重要数学工具。

1937年

- 美国贝尔实验室G. 斯梯比兹（G. Stibitz）展示了用继电器表示二进制的装置，这被认为是第一台二进制电子计算机的雏形。

1938年

- 美国E. 西蒙斯（E. Simmons）根据金属材料的应变效应发明应变片，次年美国C. 鲁格（C. Ruge）也独立发明出应变片。
- 国际电工委员会（IEC）综合各国试验室的试验数据，制定出测量球隙放电电压的

标准表。

- 苏联 A. B. 米哈依洛夫（A. B. Михайлов）发表《频率法》，标志着经典控制理论的诞生。
- 匈牙利 B. 卡洛维兹（B. Karlovitz）在美国进行的实际磁流体发电研究获得成功。

1939 年
- 开始对单变量线性定常系统进行研究，苏联称自动调节原理，美国称伺服机构理论。

1940 年
- 德国 H. 雷特（H. Raether）、美国 J. M. 米克（J. M. Meek）和 L. B. 廖勃（L. B. Loeb）在观察云室中气体放电发展过程的基础上，分别独立提出了解释气体间隙击穿的流注放电理论。

1941 年
- 美国 K. S. 柯尔（K. S. Cole）和 R. H. 柯尔（R. H. Cole）提出柯尔－柯尔圆图，它是以电介质复电容率的实部为横轴，虚部为纵轴，描述二者间关系的一种图形表示法，可用来校核德拜方程。

1942 年
- 美国 F. J. 哈里斯（F. J. Harris）引入传递函数概念。
- 德国 J. G. 齐格勒（J. G. Ziegler）和美国 N. B. 尼科尔斯（N. B. Nichols）给出了 PID 控制器的最佳参数整定方法。

1943 年
- 美国 W. S. 莫克罗（W. S. Mcculloch）、W. 彼特（W. Pitts）在分析、总结神经元基本特性的基础上首先提出神经元的数学模型。

1945 年
- 美国无线电公司（RCA）制成第一台全电子管彩色电视机。
- 美国 H. W. 伯德（H. W. Bode）出版专著《网络分析和反馈放大器设计》，完善了系统分析和设计的频域方法。
- 美国 L. A. 麦科尔（L. A. MacColl）出版《伺服机构的基本理论》，是第一本关于经典控制理论的专著。

1946 年
- 瑞士 F. 布洛赫（F. Bloch）和美国 E. M. 柏塞尔（E. M. Purcell）同时发现核磁共振现象，使磁场测量的准确度可达到 10^{-6}T。
- 美国 P. 埃克特（P. Eckert）和 J. 莫克利（J. Mauchly）制成世界上第一台电子数字计算机 ENIAC（electronic numerical integrator and computer，中译电子数字积分计算机，简称埃尼阿克），标志着电子计算机时代的到来。
- 电子数字计算机进入第 1 代电子管数字计算机时期。

1947 年
- 美国 W. B. 肖克莱（W. B. Shockley）、J. 巴丁（J. Bardeen）和 W. H. 布拉顿（W. H. Brattain）发明晶体管，从此出现含晶体管组成的第二代电子电路。
- 美国 H. M. 詹姆斯（H. M. James）、N. B. 尼科尔斯（N. B. Nichols）和 R. S. 菲利普斯（R. S. Phillips）三人合著出版第一本经典控制理论教材《伺服机构理论》。

1948 年
- 美国 N. 维纳（N. Weiner）发表《控制论》，从信息的角度研究了反馈系统的本质，为控制论奠定了基础。
- 美国 C. E. 香农（C. E. Shannon）发表《通信的数学基础》，为信息论奠定了基础。
- 美国 W. R. 伊文斯（W. R. Evans）提出系统的根轨迹分析法，是一种易于工程应用、求解闭环特征方程根的简单图解方法。
- 美籍匈牙利裔 J. V. 诺依曼（J. von Neuman）比较了人脑结构与存储程序式计算机的根本区别，提出了以简单神经元构成的再生自动机网络结构。

1950 年
- 美国 W. L. 考德威尔（W. L. Caldwell）首次提出自适应控制的设想。

1951 年
- 美国西屋电气公司制成六氟化硫断路器。

1952 年
- 荷兰 B. H. 特勒根（B. H. Tellegen）提出特勒根定理。
- 美国麻省理工学院开发成功用于控制臂的数字控制系统。
- 美国 Non-linear 公司制成出世界上第一台电子式电压表。
- 英国 G. W. A. 达默（G. W. A. Dummer）第一次提出集成电路设想。

1953 年
- 美国哥伦比亚大学 G. 汤斯（G. Townes）、J. P. 戈登（J. P. Gordon）和 H. J. 齐格勒（H. J. Zeigler）制成量子放大器——一种能用光放大微波信号的装置。
- 英国 S. 霍普森（S. Hobson）提出零磁通电流互感器，通过补偿使主铁芯二次回路负荷为零，可有效提高电流互感器的准确度；后又出现电流比较仪；两者的准确度可达到 10^{-6} 以上，所测量的一次电流可高达 100kA。

1954 年
- 中国钱学森全面总结了经典控制理论，出版《工程控制论》。
- 美国 B. 贾菲（B. Jaffe）制成钛锆酸铅（PZT）二元系压电陶瓷，为压电陶瓷的研究与应用奠定了基础。
- 美国 C. S. 斯密司（C. S. Smith）发现锗和硅的压阻效应，使半导体成为力敏电阻材料中的新材料。
- 美国 J. 巴克斯（J. Barkus）等推出

FORTRAN（formula translation）语言，它是第一个广泛使用的通用高级程序设计语言。

1955 年

- 荷兰 W. 海曼（W. Hayman）等人发现正温度系数效应，在钛酸钡（$BaTiO_3$）中加入微量稀土元素，其室温电阻率将大幅度下降而成为半导体陶瓷，当温度上升到它的居里温度时，其电阻率将增大 4～10 个数量级；可用作正温度系数温敏材料。
- 美国贝尔实验室制成变容二极管，它为电视机、收音机中的电子调谐奠定了基础。

1956 年

- 美国研制出最先用于电力领域的半导体器件——硅整流二极管，又称电力二极管。
- 澳大利亚汤普森（A. M. Thompson）和兰帕德（D. G. Lampard）发明计算电容（由四个柱形电极构成），其电容量可准确计算，准确度达到 10^{-7}～10^{-8} 量级，替代了之前使用的计算电感，成为新的电学阻抗基准。
- 美国 J. 麦卡锡（J. McCarthy）、M. 明斯基（M. Minsky）等十名科学家提出术语“人工智能”，开始了人工智能的研究。
- 推出第一个专用程序设计语言——APT 语言。
- 苏联 Л. С. 庞特里雅金（Л. С. Понтрягин）创立了极大值原理（也可称极小值原理），美国 R. E. 贝尔曼（R. E. Bellman）创立了动态规划，为最优控制奠定了基础。

1957 年

- 美国 J. 巴丁（J. Bardeen）、L. 库珀（L. Cooper）和 J. 施里弗（J. Schrieffer）提出 BCS 超导微观理论，把超导现象看作一种宏观量子效应。
- 美国通用电气公司（GE）的 F. W. 古茨维勒（F. W. Gutzwiller）制成实用晶闸管。

1958 年

- 电子数字计算机进入第 2 代晶体管数字计算机时期。
- 日本江崎玲於奈（L. Esaki）发现高掺杂窄 PN 结的正向伏安特性中存在负阻现象，发明了隧道二极管。
- 美国通用电气公司（GE）和克里斯特洛尼克斯公司制成商用场效应管。
- 美国德克萨斯仪器公司研制出世界上第一块集成电路，并于 1959 年 3 月公布了该成果。

1959 年

- 美国 R. N. 诺伊斯（R. N. Noyce）制成第一块利用平面工艺的集成电路。
- 美国贝尔实验室 J. 艾特拉（J. Atalla）和 D. 卡恩（D. Kahng）制成首个绝缘栅场效应晶体管。
- 中国科学院长春光学精密机械研究所制成 10 万倍大型电子显微镜，分辨率优于 2.5nm。
- 美籍匈牙利裔 R. E. 卡尔曼（R. E. Kalman）提出卡尔曼滤波理论。
- 美国阿夫可（Avco）公司制成功率为 11.5kW 的磁流体发电装置，运行 10s。

1960 年

- 美籍匈牙利裔 R. E. 卡尔曼提出控制系统的可控性和可观测性。
- 罗马尼亚 V. M. 波波夫（V. M. Popov）建立频率域形式的判据，是研究绝对稳定性问题的一个重要方法。
- 第一届全美联合自动控制会议上，将研究单变量控制问题的理论称为经典控制理论，研究多变量控制问题的理论称为现代控制理论。
- 美国 A. J. 佩利（A. J. Perlis）推出 ALGOL 60（algorithmetic language 60）算法语言，它是第一个用程序设计语言的语法严格形式定义的通用算法语言。
- 美国国防部正式推出 COBOL 语言（common business oriented language，面向商业的通用语言），它是使用最广泛的商用、公用数据处理语言。
- 美国 J. 麦卡锡（J. McCarthy）提出 LISP 语言（list Processing），它是表处理语言，用于描述列表及其处理，在人工智能领域内广泛使用。

1961 年

- 美国 E. N. 洛伦兹（E. N. Lorenz）发现了混沌现象。
- 美国 G. 戈登（G. Gordon）等推出 GPSS（general purpose system simulater）通用系统仿真语言，它广泛应用于系统仿真的程序设计。

1962 年

- 英国 B. D. 约瑟夫森（B. D. Josephson）在理论上预言了超导隧道效应，1963 年美国 P. 安德森（P. Anderson）和 J. 罗厄尔（J. Rowell）用实验观测证实了此预言，产生了超导电子学这一新学科。
- 英国 J. C. 马丁（J. C. Martin）将马克斯发生器与传输线技术结合起来，产生了持续时间短达纳秒的高功率脉冲。
- 美国无线电公司（RCA）制造出金属氧化物半导体晶体管（MOSFET）。
- 美国 R. N. 霍耳（R. N. Hall）等人研制成第一个半导体激光二极管。
- 德国 C. A. 佩特里（C. A. Petri）在博士论文中提出 Petri 网的概念，也是常用

的离散动态事件系统分析方法。

1963 年
- 基于约瑟夫森超导隧道效应，可使磁场测量的下限小到 10^{-15}T，这一效应为确立以物理常数作基准来绝对测量磁场的方法提供了可能。
- 美国喜万年（Sylvania）公司发明了 TTL 集成电路。
- 美国仙童半导体（Fairchild Semiconductor）公司 F. M. 万拉斯（F. M. Wanlass）和 C. T. 萨（C. T. Sah）首次提出 CMOS 技术，为低功耗集成电路打下了基础，成为当今主流数字集成电路的生产技术。

1964 年
- 电子数字计算机进入第 3 代集成电路数字计算机时期。
- 罗马尼亚 V. M. 波波夫提出超稳定的概念和理论，并在 1966 年出版专著《控制系统的超稳定性》。
- 美国 G. M. 阿姆德尔（G. M. Amdahl）等人为解决程序可移植性，按系列机的概念提出计算机系统结构。
- 美国 J. G. 凯梅尼（J. G. Kemeny）与 T. E. 卡茨（T. E. Kurtz）推出易学易用的通用交互式程序设计语言 BASIC 语言（beginners all-purpose symbolic instruction code）。

20 世纪 60 年代
- 出现了机电式电能表，它以感应系测量机构作为工作元件，利用传感器完成电能-脉冲转换，再由电子电路对脉冲做适当处理，从而实现对电能的测量。
- 出现多种利用晶体管制作的数字式电工测量仪表，例如数字式电压表、电流表、功率表、谐波分析仪等。

1965 年
- 美国 J. W. 库利（J. W. Cooley）和 T. W. 图基（T. W. Turkey）提出计算离散傅里叶变换的快速算法。
- 美籍华裔傅京孙首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统中。
- 美国 L. A. 扎德（L. A. Zadeh）发表《模糊集》论文，创立了模糊集合论。

1966 年
- 英籍华裔高锟（K. C. Kao）从理论上证明了用光纤作为传输介质以实现光通信的可能性，并预言了制造通信用超低耗光纤的可能性。
- 美国无线电公司（RCA）制造出 CMOS 集成电路和第一块门阵列电路（50 个门）。
- 美国贝尔实验室使用硅外延平面工艺制成第一块大规模集成电路。
- 瑞士 N. 沃思（N. Wirth）和英国 C. A. R. 霍尔（C. A. R. Hoare）提出数据结构概念。
- 德国 H. S. 维辰豪森（H. S. Witsenhausen）最早研究混杂系统理论。
- 美国 J. M. 孟德尔（J. M. Mendel）提出“人工智能控制”的概念，在空间飞行器的学习控制系统中应用了人工智能技术。

1967 年
- 美国无线电公司（RCA）制成大规模集成电路。
- 挪威 O. J. 达尔（O. J. Dahl）和 K. 奈加特（K. Nygaard）推出第一个面向对象的语言 SIMULA67 语言（simulation language）。

1968 年
- 美国建成 18MW 磁流体发电装置。
- E. A. 费根鲍姆（E. A. Feigenbaum）等在总结通用问题求解系统经验的基础上，结合化学专门知识，研制了世界上第一个专家系统 dendral，可推断化学分子结构。
- 日本松下公司的松冈（Matsuoka）发现了一种新型陶瓷材料——氧化锌，它具有很好的非线性，后被广泛应用于过电压保护。

1969 年
- 美国 W. S. 博伊尔（W. S. Boyle）和 G. E. 史密斯（G. E. Smith）共同发明了电荷耦合器件，主要应用于固体成像、信号处理和大容量存储器三个方面。
- 美国贝尔实验室推出多用户、多任务的 UNIX 操作系统，支持多种处理器架构，属于分时操作系统。
- 美国在 ARPA（阿帕网）制定的协定下将四所大学的四台主要计算机连接起来，出现互联网（internetwork，简称 internet），又称因特网，是广域网、局域网及单机按照一定的通信协议组成的国际计算机网络。

1970 年
- 电子数字计算机进入第 4 代大规模集成电路计算机时期。
- 美国 E. F. 科德（E. F. Codd）提出关系模型概念，基于此模型出现关系数据库管理系统。
- 美国康宁公司（Corning Glass Works）制成损耗为 20dB/km 的石英纤维，证明了光纤作为通信介质的可能性。

1971 年
- 美国英特尔公司采用 8μm PMOS 工艺，推出 4 位微处理器 4004 芯片，主频 108kHz，2250 个晶体管。
- 美国英特尔公司推出 1KB 动态随机存储器（DRAM），标志着大规模集成电路时代的来临。
- 瑞士 N. 沃思推出 PASCAL 语言，它是在 ALGOL 60 基础上发展起来的结构

化程序设计语言。
- 美国施乐公司的 G. 斯塔克伟泽（G. Starkweather）发明激光打印机。

1972 年
- 加拿大建成世界上第一座晶闸管换流站（伊尔河换流站）。
- 美国英特尔公司采用 8μm PMOS 工艺，推出 8 位微处理器 8008 芯片，主频 108kHz，3500 个晶体管。
- 美国 D. M. 里奇（D. M. Ritchie）推出 UNIX 操作系统下的主干语言 C 语言；1978 年后，C 语言被先后移植到大、中、小及微型机上；C 语言应用范围广泛，具备很强的数据处理能力，既适于编写系统软件，又适于编写应用软件。
- 法国 A. 科曼劳尔（A. Colmerauer）和 P. 罗塞尔（P. Roussel）推出主要用于人工智能的逻辑程序设计语言 PROLOG 语言（programming in logic）。

1973 年
- 苏联 20.5MW 磁流体发电装置投入运行。
- 美国 L. A. 扎德给出了模糊逻辑控制的定义和相关的定理。

1974 年
- 美国 R. S. 陶格（R. S. Turgel）发明电压、电流波形等时间间隔采样技术，电磁测量与仪表技术进入数字化发展阶段。
- 美国 J. 科克（J. Cocke）提出 RISC（精简指令系统计算机），RISC 结构是计算机体系结构的一次重大变革。
- 英国 E. H. 马丹尼（E. H. Mamdani）应用模糊集和模糊语言逻辑提出了模糊控制器，并应用于工业过程控制，之后又研究出自组织模糊控制器，标志着模糊控制论的诞生。

20 世纪 70 年代
- 研制出基于集成电路的数字式电压表；随后相继制成基于集成电路的数字万用表、数字示波器等很多种数字式电工测量仪器仪表。
- 以数字式功率表为基本单元，相继出现多种磁性材料损耗等特性的测试仪器，如数字式铁损测试仪、自动爱泼斯坦仪、单片硅钢片测试仪等；电子式直流磁滞回线仪、交流磁滞回线仪、损耗曲线自动记录仪也相继问世。

1975 年
- 美国 D. 彼得森（D. Pederson）开发出电子电路的计算机辅助分析程序 SPICE。
- 美国 IBM 公司推出世界上第一台商品化的激光打印机。

1977 年
- 上海发电设备研究所、上海工业大学等研制成中国第一台 400kVA 超导发电机。

1978 年
- 美国英特尔公司采用 3μm NMOS 工艺，推出 16 位微处理器 8008 芯片，主频 50MHz，29 000 个晶体管。
- 64KB 动态随机存储器诞生，在不足 $0.5cm^2$ 的硅片上集成了 14 万个晶体管，标志着超大规模集成电路（VLSI）时代的来临。
- 法国 J. 理查莱（J. Richalet）提出了基于单位脉冲响应序列的模型算法控制（MAC）。

1979～1980 年
- 美国 C. R. 库特（C. R. Culter）提出基于单位脉冲响应序列的动态矩阵控制（DMC）。

1980 年
- 德国科学家 K. 冯. 克里青（Klaus von Klitzing）发现量子化霍耳效应，基于此效应诞生了取代实物电阻基准的直流量子电阻基准。
- 意大利皮埃利（Pirelli）公司制成 1100kV 自容式充油电缆，并投入实用化试验。
- 美国施乐、数字设备（Digital Equipment Corporation，DEC）和英特尔三家公司推出以太网（EtherNet）标准，以太网是应用最为广泛的局域网。

1981 年
- 德国 G. 宾宁（G. Binnig）和瑞士 H. 罗雷尔（H. Rohrer）发明扫描隧道显微镜，利用量子理论中的隧道效应，可直接观察物质表面原子（数纳米大小）的排列状态。
- 意大利西西里岛的 1000kW 太阳能电站投入运行。
- 加拿大 G. 詹姆斯（G. Zames）提出用传递函数阵的 H_∞ 范数来记述优化指标，首次用明确的数学语言描述 H_∞ 优化控制理论。
- 美国微软公司推出磁盘操作系统（DOS）。
- 美国 A. 凯（A. Kay）推出一种面向对象的程序设计语言 Smalltalk 语言。

1981～1982 年
- 美国、日本相继研制成光控晶闸管。

1982 年
- 美国通用电气公司容量 2 万 kVA 的超导发电机全负荷试运行成功。
- 日本日立公司制成 2.5kV/1kA 的门级可关断晶闸管（GTO）。
- 美国 J. J. 霍普菲尔德（J. J. Hopfield）在 1982 年和 1984 年发表了两篇关于人工神经网络的论文，随后围绕 Hopfield 方法，形成了 80 年代中期以来人工神经网络的研究热潮。
- 美国 B. 施特劳斯特卢普（B. Stroustrup）推出以 C 语言为基础、支持数据抽象技术和面向对象风格的高级通用程序设计语言 C++语言。

20 世纪 80 年代初
- 美籍华裔何毓琦（Y. C. Ho）倡导了对离

散事件动态系统理论进行系统的研究。

1983 年

- 中国国防科技大学研制成每秒亿次的“银河”巨型计算机。
- 美国通用电气公司发明绝缘栅双极型场效应管（IGBT）。
- 苏联研制的 2 万 kW 超导发电机在列宁格勒试验成功。
- 美国国防部推出一种表现能力很强的按照软件工程要求的通用程序设计语言——Ada 语言。

1984 年

- 美国 MicroSim 公司推出基于 SPICE 的微机版 PSPICE。
- 日本日立公司制成第一个 1MB 动态随机存取记忆型大规模集成电路。
- 日本东芝公司制成 256KB 静态随机存取半导体存储器。
- 日本富士电机公司制成接触器驱动电路专用集成电路。
- 法国 G. 柯恩（G. Cohen）等人提出用极大—加法代数法，从物理时间层次研究离散事件动态系统的代数特性和变化过程。
- 加拿大 B. A. 弗朗西斯（B. A. Fracis）和 G. 詹姆斯用古典函数插值理论提出 H_∞ 设计问题的最初解法，并推广到一般的多变量系统中。

1985 年

- 世界首条 1150kV 特高压输电线路在苏联投入运行。
- 美国英特尔公司采用 1.5～1.0μm CMOS 工艺，推出 32 位 80386 CPU 芯片，主频 16～33MHz，27.5 万个晶体管。
- 英国 H. W. 克罗托（H. W. Kroto）和美国 R. E. 斯莫利（R. E. Smalley）、R. F. 柯尔（R. F. Carl）共同发现“足球”结构的 C60 分子。
- 美国微软公司推出视窗操作系统——Microsoft Windows 操作系统，后不断升级，架构从 16 位、32 位再到 64 位，系统版本从 Windows 1.0 到 Windows 95、Windows 2000、Windows XP、Windows Vista、Windows 7，Windows 8.1 和 Server 服务器企业级操作系统。

1986 年

- 德国 J. G. 贝德诺尔兹（J. G. Bednorz）和瑞士 K. A. 缪勒（K. A. Müller）发现了镧、钡、铜氧化物的高温超导性，其临界温度为 35K，开启了高温超导研究的时代。
- 瑞典 K. J. 奥斯托罗姆（K. J. Astrom）发表《专家控制》，将专家系统技术引入控制系统，组成了另一种类型的智能控制系统——专家控制系统。
- 在美国 Santa Clara 大学召开的高级控制会议上，“混杂系统”一词被正式提出，成为离散事件系统研究和过程控制应用中的一个新热点。
- 美国国家仪器公司（National Instruments）提出“软件即仪器”亦即虚拟仪器概念，它是由测量功能软件支持，具有虚拟控制面板、必要仪器硬件和通信能力的基于计算机的测量仪器。

1987 年

- 美籍华裔朱经武发现了新的钇、钡、铜氧化物超导材料，把临界温度提高到了 98K。
- 美籍华裔邓青云（C. W. Tang）在实验室发现了有机发光二极体，他和 S. A. 范斯莱克（S. A. van Slyke）采用超薄膜技术，制成双层有机电致发光器件（OLED）。
- 美国 T. A. 富尔顿（T. A. Fulton）和 G. J. 多兰（G. J. Dolan）在两个微型金属隧穿结串联组成的系统上，直接观察到电导的库仑阻塞振荡现象——库仑阻塞效应。
- 英国 S. 约翰（S. John）和美国 E. 亚布罗维奇（E. Yablonovitch）分别独立提出光子晶体概念。
- 世界多家主要仪器制造商共同制定模块式仪器标准化接口总线标准 VXIbus，简称 VXI 总线；它定位于使计算机化仪器系统硬件和软件标准化，提高计算机化仪器互用性，使之更容易集成和应用。
- 美国 B. H. 麦考梅克（B. H. McCormick）等正式提出“科学计算可视化”的概念，将图形和图像技术应用于科学计算。
- 英国 D. W. 克拉克（D. W. Clarke）提出基于被控自回归积分滑动平均模型（CARIMA）的广义预测控制（GPC）。
- 加拿大 P. J. 拉马热（P. J. Ramadge）、W. M. 旺纳姆（W. M. Wonham）率先提出运用形式语言与自动机理论建立自动机监控模型，用于离散事件动态系统的逻辑层次研究。
- 在美国召开首届智能控制国际学术会议，标志着智能控制学科的诞生。

1988 年

- 美国 J. C. 多伊尔（J. C. Doyle）等人发表 DGKF 论文，证明 H_∞ 设计问题的解可以通过适当的代数 Riccati 方程得到，标志着 H_∞ 控制理论的成熟。
- 加拿大交互图像技术公司（Interactive Image Technologies）公司推出电子工作平台（EWB），可用于电子电路的仿真、分析和设计。
- 美国英特尔公司推出 FLASH 存储器

（闪烁存储器）芯片。

20世纪80年代中后期
- 提出了软测量技术：依据最优化准则，利用可测的辅助变量信息，采用数学方法、通过软件计算，实现对无法直接测量的主导变量的估测。

1990年
- 美国召开第一届纳米科学与技术国际会议，标志纳米材料科学成为材料科学的一个新分支。
- 日本电信电话公司用砷化镓系半导体膜制成当时最高速的半导体器件，制成集成电路后，能够1s处理300Gbit的数字信号。

1991年
- 日本饭岛澄男（S. Iijima）制成直径4～30nm的多壁碳纳米管。
- 中国清华大学开发出1～1.5μm CMOS超大规模集成电路成套工艺技术。
- 英国T. 伯纳斯-李（T. Berners－Lee）发表万维网（WWW，简称为Web）项目简介文章，标志着万维网（WWW）公共服务的首次亮相，WWW提供丰富的文本、图形和音频、视频等多媒体信息，已成为互联网最重要的服务。
- 美国麻省理工学院K. 阿斯顿（K. Ashton）提出物联网概念，物联网是在互联网基础上延伸的物物相连的互联网。

1992年
- 中国国家半导体工程中心拉制成直径150mm、重32kg的电路级硅单晶。
- 中国国防科技大学研制成每秒10亿次的“银河-Ⅱ”巨型计算机。

1993年
- 美国C. S. 兰特（C. S. Lent）等提出纳米量子点构成元胞自动机的概念。
- 中国计量科学研究院建成中国的1V约瑟夫森量子电压基准。

1995年
- 美国英特尔公司采用0.6μm工艺，推出64位高能奔腾MMX CPU芯片，主频150～200MHz，550万个晶体管。
- 美国Sun Microsystems公司推出Java语言，它是一种跨平台的、适用于网络环境的面向对象语言。
- 丹麦A. 海尔斯伯格（A. Hejlsberg）推出Delphi语言，它是在PASCAL语言的基础上发展而来的面向对象语言，具有可视化开发环境。

1997年
- 中国国防科技大学研制成每秒130亿次的“银河-Ⅲ”巨型计算机。
- 美国A. O. 奥洛夫（A. O. Orlov）等通过在氧化硅片上采用电子束平板印刷术工艺和阴影蒸发技术，在低于50mK温度下制造出第一个量子元胞自动机器件（量子点器件）。
- 美国国家仪器公司推出新型开放式接口总线标准PXI，比VXI总线成本低，数字接口和仪器接口功能先进，适于组建便携式计算机化测试系统。

1998年
- 荷兰S. J. 谭思（S. J. Tans）等用碳纳米管材料作为沟道，合成碳纳米管场效应管。
- 美国普林斯顿大学制成室温下工作的硅基单电子量子点晶体管（SET）。
- 美国IBM公司开发出制造高速晶体管的突破性的工艺，称为“绝缘体上的硅”，用之可制造出性能更高的芯片。

1999年
- 美国英特尔公司采用0.253μm制造工艺，推出主频450MHz的64位奔腾Ⅲ CPU芯片。
- 巴西和美国科学家发明一种纳米秤——世界上最小的“秤”，能够称量十亿分之一克的物体，即相当于一个病毒的重量。
- 中国计量科学研究院建成中国的10V可编程量子电压基准。

2000年
- 美国微软公司的丹麦人A. 海尔斯伯格（A. Hejlsberg）推出C#语言，它是由C和C++继承而来的一种简单、安全、专门为.NET应用开发的面向对象程序设计语言。

2001年
- 美国朗讯贝尔实验室制成单分子晶体管。
- 德国北威州纳米研究联合会、埃森大学、波恩大学等机构科学家组成的项目组制成单电子纳米开关的原型。
- 美国D. 史密斯（D. Smith）利用以铜为主的复合材料制成在微波波段具有负介电常数和负磁导率的物质，从而证明了左手材料的存在。
- 美国英特尔公司采用0.13μm制造工艺，推出主频1GHz的64位奔腾Ⅳ CPU芯片。

2003年
- 中国科学技术大学用量子纠缠态浓缩技术，制成远距离量子通信中最关键的单元器件——量子中继器，为远距离量子通信奠定了基础。
- 美国加利福尼亚大学伯克利分校用碳纳米管研制成直径约为500nm的电动机。

2004年
- 中国计量科学研究院建成直流量子电阻国家标准——量子化霍耳电阻基准。
- 美国英特尔公司采用90nm制造工艺，推出主频3.4GHz的64位奔腾Ⅳ CPU芯片。

2005年
- 中国科技大学用低温超高真空扫描隧道显微镜成功实现单分子自旋态的控制。
- 美国英特尔公司推出简单封装的双核奔腾处理器。

2006年
- 中国计量科学研究院建成交流高频大电

流国家基准，技术指标达到国际领先水平。

- 美国英特尔公司推出基于酷睿（Core）架构的双核处理器，这一年被认为是真正的“双核元年”。
- 美国英特尔公司采用65nm制造工艺，推出酷睿Ⅱ四核处理器。
- 中国计量科学研究院建成工频谐波功率国家基准，包括谐波电压、电流和功率，不确定度分别为0.003%、0.004%和0.005%。
- 美国谷歌公司（Google）首席执行官E. 施密特（E. Schmidt）根据C. 比希利亚（C. Bisciglia）的工作，提出“云计算”概念。

2007年

- 美国英特尔公司宣布制成每秒2万亿次的80核处理器，提供了可与超级计算机匹敌的强劲性能，功耗仅62W。

2008年

- 中国平高电气集团制成世界首台（套）1100kV气体绝缘金属封闭开关设备，2009年在特高压输电工程中投入运行。
- 美国英特尔公司采用45nm high-k工艺，推出超低功耗凌动处理器。

2009年

- 中国建成晋东南—南阳—荆门1000kV交流输电线路，并投入运行。
- 中国计量科学研究院建立了1V可编程量子电压基准。
- 中国计量科学研究院建成中国的直流大电流比例标准。
- 美国英特尔公司，采用9金属层、45nm工艺推出Nehalem-EX 8核心至强处理器。

2010年

- 中国国防科技大学研制的每秒千万亿次超级计算机“天河一号”投入使用，在国际TOP500组织公布的最新全球超级计算机前500强排行榜中位居第一。
- 中国建成云南—广东±800kV直流输电工程，6月18日投入运行，输送功率为5000MW，是世界首条±800kV特高压直流输电工程；同年，中国建成向家坝—上海±800kV直流输电工程，7月8日投入运行，输送功率为6400MW。

2011年

- 中国建成晋东南和南阳1000kV特高压交流串补工程，是世界电压等级最高的交流串补工程。
- 中国建成青海格尔木—西藏拉萨±400kV直流输电工程，是世界海拔最高的直流输电工程。
- 美国英特尔公司成功开发世界首个3D晶体管，称为tri-Gate。

2012年

- 中国西北师范大学的学者首次记录了自然界的球形闪电。
- 中国西安交通大学和西安西电高压套管有限公司合作制成交流1100kV/3150A油-六氟化硫胶浸纸电容式变压器套管。
- 中国西电公司与西安交通大学合作制成±800kV特高压干式直流套管。

2013年

- 中国国防科技大学研制成功每秒5.49万万亿次超级计算机“天河二号”，在国际TOP500组织公布的最新全球超级计算机前500强排行榜中依然位居第一。
- 中国复旦大学张卫在《科学》杂志上宣布了一种全新的微电子基础器件的诞生——半浮栅晶体管（SFGT）。
- 中国王田苗等研制的中国第一台基于再生风能驱动的机器人“极地漫游者”在南极中山站附近冰盖上“走”出了第一步，“极地漫游者”在南极开展基于风能发电驱动技术、复杂地面适应性的自平衡机构技术、基于视觉、激光与GPS融合的冰盖自主导航等关键技术实验研究。
- 中国建成淮南—上海1000kV交流输电工程，是世界首条同塔双回特高压交流输电工程。
- 中国建成汕头南澳岛三端柔性直流输电工程，是世界首个多端柔性直流输电工程。
- 美国斯坦福大学M. 夏拉克尔（M. Shulaker）等制成全部以碳纳米管组成的电脑（Cedric）。
- 以色列特拉维夫的J. 艾希鲍姆（J. Eichbaum）制成“透明屏幕”平板电脑Grippity，用户可以双手同时或分别在正面和背面操作，可以在正面屏幕上看到整个操作过程。

2014年

- 1月16日，中国互联网络信息中心（CNNIC）在北京发布第33次《中国互联网络发展状况统计报告》，截至2013年12月，中国网民规模达6.18亿；其中，手机网民规模达5亿。

条目标题汉字笔画索引

说　明

一、本索引供读者按条目标题的汉字笔画查检条目。

二、条目标题按第一字的笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的字按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括㇆乚𡿨等）的顺序排列。第一字相同的，依次按后面各字的笔画数和起笔笔形顺序排列。

三、以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的条目标题依次排在汉字开头的条目标题的后面。

四、参见条（虚条）的页码采取虚实条兼注的方式，即参见条页码在括号外，被参见条页码在括号内。

九画

［一］

十画

［一］

［乛］

十一画

［一］

［丨］

［丿］

［丶］

［乛］

十二画

［一］

［丨］

［丿］

条目标题外文索引
(INDEX OF ARTICLES)

A

B

C

D

N

O

Q

R

S

内　容　索　引

说　明

一、本索引是全卷条目和条目内容（含插图）的主题分析索引。索引主题按汉语拼音字母的顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时，按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的字按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括亅乚く等）的顺序排列。第一字相同的，按第二字，余类推。以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的主题，依次排在汉字索引主题的后面。

二、设有条目的主题用黑体字，未设条目的主题用仿宋体字。

三、索引主题之后的阿拉伯数字是主题内容所在的页码，数字之后的小写拉丁字母表示索引内容所在的版面区域。本书正文的版面区域划分如右图。

a	d
b	e
c	f

C

D

E

F

K

L

M

T

Y

Z

插 图 索 引

电工技术基础卷（第三版）修订人员名单

（按姓氏笔画排列）

于歆杰　王凤雨　王保义　王德文　王赞基　包哲静　宁改娣　华成英
刘　丽　齐冬莲　齐　磊　江　波　李　刚　李盛涛　杨拴科　杨　强
吴凯峰　吴维韩　何金良　何学农　汪芙平　宋　雨　张卫东　张少敏
张　波　张　荣　张荣华　张贵新　张森林　陆文娟　陈文洁　陈昌渔
陈　波　陈　晴　林　涛　卓　放　周立柱　周远翔　郑　军　郑君里
孟玉婵　赵文清　赵　伟　钟力生　姜丽敏　袁和金　栗　宁　翁　明
高力伟　高文胜　高胜友　谈克雄　曹杰玉　崔　翔　董新洲　程晓荣
鲁　斌　曾　嵘　雷银照　慕春棣　蔡　理　颜文俊

电工技术基础卷（第一版）撰稿人员名单

（按姓氏笔画排列）

于　渤	尤德斐	马乃祥	马信山	王乃庆	王友功	王寿泰	王志宏
王昌长	王泽兵	王品常	王　健	王德芳	毛根生	方正瑚	孔繁胜
邓泰林	左　垲	石教英	叶又新	叶治政	叶登清	叶德璇	冯国华
吕乃康	朱秉升	朱森良	朱德恒	华自圭	刘承柱	刘桂云	刘恩科
刘辅宜	刘耀南	江辑光	江慰德	汤之璋	汤子瀛	汤为杰	许　遐
许锡章	孙树勤	巫松桢	李　菊	李菊初	李　谦	李翰荪	李赣生
杨长生	肖达川	吴百诗	吴寿锽	吴南屏	吴美朝	吴继东	邱昌容
邱家驹	邱毓昌	何志均	何金茂	余尚银	闵应华	汪日康	张乃国
张少伟	张仁豫	张志清	张钟华	张继文	张厥标	张德馨	陈允康
陈加仁	陈光隧	陈自荣	陈寿田	陈昌渔	陈欣卓	陈增武	陈鹤皋
范丽娟	林忱平	易大义	罗承沐	罗晋生	金廷赞	金连甫	金维芳
郑君里	郑英华	郑振华	赵修民	赵恒庆	荆仁杰	胡德河	涂君载
费正生	顾立麓	顾惠芬	顾锦汶	钱源平	倪光正	徐立亮	徐传骧
徐跃祖	徐瑞德	徐毓良	凌　愍	高光润	唐泽荷	唐统一	浦树良
谈克雄	陶　欣	黄旭晨	黄剑铎	黄嘉豫	戚庆成	龚绍文	康华光
阎　石	巢来春	彭时雄	董大象	蒋静坪	韩　旻	程世镐	童建中
谢大荣	谢恒堃	鲍道胤	潘云鹤	潘雪增	戴先中		

电工技术基础卷（第二版）修订人员名单

（按姓氏笔画排列）

于　渤　王友功　王昌长　王保义　王翠茹　文福拴　叶治政　叶德璇
朱德恒　刘辅宜　江缉光　孙国忠　巫松桢　杨学昌　肖达川　吴百诗
吴南屏　邱昌荣　邱家驹　何金茂　宋　雨　张玉明　张志清　陈昌渔
陈骏林　陈基禄　罗承沐　罗晋生　郑顾平　赵　伟　姜建国　袁建生
徐传骧　唐泽荷　唐统一　诸　静　谈克雄　黄志强　戚庆成　康华光
蒋静坪　韩　旻　程晓荣　寒　枫

电工技术基础卷（第三版）
主要编辑出版人员名单

责任编辑 姜丽敏　易　攀

索引编辑 姜丽敏　易　攀

设计负责 王建华　李东梅　李卫东　杨志国

封面设计 王红柳

正文设计 赵姗姗　肖光艺

责任描图 陈丽梅　安同贺

责任校对 罗凤贤　王开云

责任印制 邹树群


中国电力出版社

[General Information]
书名=中国电力百科全书 电工技术基础卷（第3版）
页数=449
SS号=13608535